

POTENCIAL DE HIBRIDAÇÃO DE SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO POR ENERGIA SOLAR

Bárbara Alexandra Belles Azeredo Coelho

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente

Orientador(es): Engenheiro David Pereira Loureiro
Professora Doutora Rita do Amaral Fragoso

Júri:

Presidente: Doutora Elizabeth da Costa Neves Fernandes de Almeida Duarte, Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

Vogais: Doutor Olívio Godinho Patrício, Professor Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa;

Engenheiro David Pereira Loureiro, Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P

“May the odds be ever in my favor”

Suzanne Collins

Agradecimentos

A realização e a concretização da presente dissertação apenas foram possíveis pelo apoio e colaboração de algumas pessoas, às quais quero expressar o meu sincero agradecimento.

Ao Instituto Superior de Agronomia pelos fantásticos cinco anos de aprendizagem e de conhecimento que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal.

À Dra. Rita Fragoso, por todos os esclarecimentos de dúvidas, pela cuidadosa revisão do texto, por toda a disponibilidade que me dispensou e pela sua objetividade na realização e conclusão desta dissertação.

Ao Engenheiro David Loureiro, por me ter proporcionado este desafio e pela orientação científica e conhecimentos transmitidos.

Aos meus pais, por me terem dado a oportunidade de ter acesso a uma formação superior, pelo esforço para que nada me faltasse, por me apoiarem e incentivarem sempre, por terem sempre acreditado nas minhas capacidades, por toda a paciência, por todo o amor e carinho que sempre demonstraram. Sou quem sou, muito por vossa causa e agradeço-vos por isso.

À minha avó, por ter sido a minha segunda mãe, que ajudou na minha educação e pelo seu amor incondicional. É mais um acontecimento em que não estás presente, mas sei que, de onde estás, estás muito orgulhosa pela conclusão desta etapa.

Aos meus amigos que fizeram parte deste percurso, principalmente à Luísa, por ter sido a melhor pessoa que a faculdade me deu, pelo percurso que fizemos desde o segundo ano, por todos os trabalhos de grupo, por todas as recordações, por todas as viagens de autocarro, por todas as boleias, por todos os conselhos e desabafos, pelo apoio incondicional, pela muita paciência, pela revisão da dissertação e por ter estado sempre presente.

Por fim, ao grupo que se formou no final deste percurso, Cátia, Nádia, Ricardo e Rick, pelo companheirismo, pelos almoços, lanches e cafés ao longo destes longos meses.

Resumo

Atualmente, a escassez de água no planeta é um problema que afeta vários setores da sociedade, comprometendo também a sustentabilidade ambiental. Neste contexto, a dessalinização poderá assumir um papel importante como alternativa ao abastecimento de água, no entanto, o elevado consumo de energia e a descarga do concentrado representam os seus principais inconvenientes. De forma a minimizar os seus impactes, associou-se a esta tecnologia o uso de energias renováveis, diminuindo o consumo de energia fóssil e, por outro lado a associação dos processos de dessalinização de Humidificação-Desumidificação (HDH) e de Osmose Inversa (OI), deverá contribuir para a redução da produção de concentrado rejeitado, com o intuito de se atingir a *zero discharge*, tornando o processo de dessalinização ambientalmente sustentável.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de hibridação de sistemas de dessalinização por energia solar.

Com a hibridação destas duas tecnologias pretende-se que a dessalinização se torne uma forma eficaz de suprir as necessidades das populações costeiras, quer em termos de descentralização do abastecimento, quer em autonomia energética e segurança do abastecimento de água. Esta hibridação permite diminuir o consumo de energia necessário para o processo de dessalinização, assim como, aumentar a qualidade de água doce produzida, potenciando as melhores características das duas tecnologias.

Palavras-chave: Dessalinização, Energia Solar, Humidificação-Desumidificação, Osmose Inversa, Hibridação

Abstract

Currently, the shortage of water on the planet is a problem that affects many sectors of society, also threatening environmental sustainability. In this context, desalinization may play an important role as an alternative source of water, however, the high energy demand and the discharge of brine concentrate represent its major drawbacks. In order to minimize these impacts, renewable energy sources can be associated to this technology, reducing consumption of fossil fuels and, on the other hand humidification-dehumidification and reverse osmosis processes, could contribute to the reducing of total amount of rejected brine, contributing to a more sustainable desalination process.

This study aims to evaluate the potential for hybridization of desalination systems, by solar energy, which can be an alternative system for water supply.

Hybridization of these two processes can contribute to a wider use of desalination an effective way to meet the needs of coastal communities, both in terms of decentralize water supply and energy independence and security of water supply. This hybridization allows to reduce the power consumption required for the process of desalination, as well as increase the quality of fresh water produced, enhancing the best features of both technologies.

Keywords: Desalination, Solar Energy, humidification-dehumidification, Reverse Osmosis, Hybridization

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo global	1
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Estrutura da dissertação	2
Capítulo 2 - Estado da Arte	3
2.1. Problemática da escassez de água no planeta	3
2.1.1. Escassez de água em Portugal	6
2.2. Dessalinização	9
2.2.1. Etapas no tratamento de água dessalinizada	12
2.2.2. Processos de dessalinização	13
2.2.4. Impactes Ambientais	25
2.2.5. Gestão do concentrado	26
2.2.6. Unidades de dessalinização	30
2.3. Recurso energético	37
2.3.1. Energia solar	42
2.4. Dessalinização por energias renováveis	46
Capítulo 3 - Atividade experimental	48
3.1. Protótipo Humidificação-desumidificação – Projeto SelfWater	49
3.1.1. Procedimento	52
3.2. Unidade Piloto Osmose Inversa	54
3.2.1. Procedimento	55
3.3. Resultados obtidos e discussão	55
Capítulo 4 - Análise comparativa de sistemas de dessalinização	69
4.1. Sistema de Humidificação-Desumidificação	69
4.2. Sistema de Osmose Inversa	70
4.3. Hibridação do sistema de HDH com reciclagem de concentrado, com o sistema de OI	70
Capítulo 5 - Conclusões e Perspetivas Futuras	75
Capítulo 6 - Referências Bibliográficas	76

Índice de figuras

Figura 1 - Distribuição de água no planeta (UNEP, 2008)	3
Figura 2 - Recursos de água doce existentes no planeta, por continente (Shiklomanov, 2003)	4
Figura 3 - Disponibilidade de água no Mundo (FAO, 2007)	4
Figura 4 - Consumo e extração de água ao longo de vários anos por sectores (agrícola, doméstico e industrial) de 1900 a 2025 (Shiklomanov, 1999).....	5
Figura 5 - Índice de seca meteorológica em agosto de 2015 (IPMA, 2015)	7
Figura 6 - Situação das albufeiras em agosto de 2015 (SNIRH, 2015)	7
Figura 7 - Procura de água por setor em 2010 (PNA).....	8
Figura 8 - Ciclo Hidrológico (UNEP, 2008).....	9
Figura 9 - Esquema Geral do Processo de Dessalinização (adaptado de Levy, 2008)	10
Figura 10 - Crescimento mundial do mercado da dessalinização (Shatat, M., et al., 2013) .	10
Figura 11 - Distribuição global da capacidade mundial de dessalinização (Lattemann et al., 2010).....	11
Figura 12 - Linha convencional de tratamento de água por dessalinização	12
Figura 13 - Processos de dessalinização (adaptado de Gorjian et al., 2015).....	14
Figura 14 - Esquema de uma instalação de Osmose Inversa (adaptado de Semiat, R., 2000)	15
Figura 15 - Princípio de funcionamento do processo de humificação-desumificação (Narayan et al., 2010).....	17
Figura 16 - Classificação dos processos de humificação-desumificação baseados na configuração do ciclo (Narayan et al., 2010).....	17
Figura 17 - Processo de funcionamento da tecnologia Humificação-Desumificação de ar fechado, água aberta de água aquecida (Narayan et al., 2010)	18
Figura 18 - Variação da temperatura da água do mar com a latitude (Kennish, M.J., 2001)	20
Figura 19 - Condutividade elétrica da água do mar em função da temperatura e salinidade (Kennish, M.J., 2001)	21
Figura 20 - Variação da salinidade da água do mar com a latitude (Kennish, M.J., 2001) ...	21
Figura 21 - Propriedades termoquímicas da água do mar (Kennish, M.J., 2001)	22
Figura 22 – Produção primária global em ecossistemas marinhos (Kennish, M.J., 2001)	23
Figura 23 - Emissários submarinos da costa portuguesa (Santos et al., 2011)	24
Figura 24 - Técnicas de gestão do concentrado (adaptado de Voutchkov, 2014)	27
Figura 25 - Diagrama da zona gradiente (Giestas, 2000)	29
Figura 26 - Diagrama de um lago solar de gradiente salino (Lu, 2001).....	30

Figura 27 - Unidade de dessalinização de Porto Santo (IGA, 2013)	35
Figura 28 - Unidade de dessalinização do Alvor (Jorge et al., 2014)	36
Figura 29 - Consumo de energia primária por região do Mundo (International Energy Agency, 2015).....	37
Figura 30 - Consumo mundial de energia (REN21,2015))	38
Figura 31 - Consumo mundial de energias renováveis (REN21, 2011).....	38
Figura 32 - Consumo mundial de energia por setor (EIA, 2012)	39
Figura 33 - Consumo de energia na Europa (Eurostat, 2013).....	39
Figura 34 - Consumo de energias renováveis na Europa (Eurostat, 2013)	40
Figura 35 - Distribuição europeia do consumo de energia por setor (Eurostat, 2014).....	40
Figura 36 - Consumo de diferentes fontes de energia (DGEG, 2014).....	41
Figura 37 - Consumo de energias renováveis em Portugal (REN, 2016)	41
Figura 38 - Consumo de energia por setor de atividade (DGEG, 2014).....	42
Figura 39 - Índice de radiação solar no planeta (GeoModel Solar, 2013)	42
Figura 40 - Índice de radiação solar na Europa (SolarGis, 2011).....	43
Figura 41 - Índice de radiação solar em Portugal Continental (IPMA, 2013)	43
Figura 42 - Aplicações da energia solar térmica (Mendes, J.F., 2010).....	45
Figura 43 - Edifício Solar XXI (LNEG).....	46
Figura 44 - EU – SOLARIS (LNEG)	46
Figura 45 - Uso de energias renováveis na dessalinização de água (Quteishat & AbuArabi, 2012).....	47
Figura 46 - Possível configuração de recursos energéticos solares com tecnologias de dessalinização de água (adaptado de Shatat, M., et al, 2013).....	47
Figura 47 - Interior da câmara dessalinizadora do protótipo HDH e respetivo esquema (LNEG).....	49
Figura 48 - Unidade de ensaio de dessalinização solar térmica HDH (LNEG)	51
Figura 49 - Esquema de funcionamento do protótipo e respetiva legenda (adaptado de SelfWater, 2010)	52
Figura 50 - Esquema do processo HDH	53
Figura 51 - Configuração do Evaporador.....	53
Figura 52 - Piloto Osmose Inversa (LNEG).....	54
Figura 53 - Registo da variação das temperaturas para o caudal de 70 L/h.....	57
Figura 54 - Registo da variação das temperaturas para o caudal de 84 L/h	57
Figura 55 - Registo da variação das temperaturas para o caudal de 111 L/h	57
Figura 56 - Diferença de temperatura da água no Condensador	58
Figura 57 - Diferença de temperatura da água no Evaporador	59

Figura 58 - Diferença de temperatura do ar no Evaporador	60
Figura 59 - Diferença de temperatura do ar no Condensador	60
Figura 60 - Taxa de conversão para os diferentes caudais	61
Figura 61 - Consumo específico de energia para os diferentes caudais	62
Figura 62 – Potência de aquecimento para os diferentes caudais	63
Figura 63 – Taxa de remoção de sais para os diferentes caudais	64
Figura 64 - Média de temperaturas em função do caudal mássico da água e potência 3000 W, com 9 m ² de evaporador	65
Figura 65 - Média de temperaturas em função do caudal mássico da água e potência 4000 W, com 9 m ² de evaporador	65
Figura 66 - Aproximações realizadas para a comparação do trabalho experimental com a modelação.....	66
Figura 67 – Balanço de massa para o sistema de HDH.....	69
Figura 68 - Balanço de massa para o sistema de Osmose Inversa	70
Figura 69 - Balanço de massa para o sistema de HDH com reciclagem de concentrado com 15 ciclos	71
Figura 70 - Balanço de massa para o sistema de Osmose Inversa	72
Figura 71 - Layout da instalação de hibridação do sistema de HDH com reciclagem de concentrado, com o sistema de OI	74

Índice de tabelas

Tabela 1 - Etapas do processo de pré-tratamento (Mickley et al. 1993)	12
Tabela 2 - Etapas do processo de pós-tratamento (Mickley et al. 1993)	13
Tabela 3 - Equipamentos de dessalinização existentes no mercado.....	19
Tabela 4 - Composição da água do mar (Bebianno, 2007)	22
Tabela 5 - Estações de dessalinização na Costa Oeste da Arábia Saudita (adaptado de El-Ghonemy, 2012).....	31
Tabela 6 - Estações de dessalinização na Costa Este da Arábia Saudita (adaptado de El-Ghonemy, 2012).....	32
Tabela 7 - Comparação entre 4 estações de dessalinização nos EUA (adaptado de Riha e Vedachalam, 2012)	33
Tabela 8 - Principais regiões responsáveis pela dessalinização nos Emirados Árabes Unidos	34
Tabela 9 - Valores referência para a unidade de Osmose Inversa do Alvor (adaptado de Jorge et al., 2014)	36
Tabela 10 - Capacidade instalada de energia solar em Portugal (DGEG, 2014)	44
Tabela 11 - Associação das tecnologias de dessalinização com energia solar (PRODES) ..	48
Tabela 12 - Tabela resumo dos parâmetros medidos nos ensaios	55
Tabela 13 - Valores da salinidade obtidos nos ensaios.....	56
Tabela 14 - Diferenciais de temperatura para caudal 84 L/h e caudal mássico 0,02 L/s, com potência de 3000 W	67
Tabela 15 - Diferenciais de temperatura para caudal 111 L/h e caudal mássico 0,03 L/s, com potência de 4000 W	67
Tabela 16 - Taxas de conversão resultantes do trabalho experimental e da modelação.....	67
Tabela 17 - Produções de destilado resultantes do trabalho experimental e da modelação.	67
Tabela 18 - GOR resultantes do trabalho experimental e da modelação	67
Tabela 19 - Resultados para as concentrações 5 mS/cm e 10 mS/cm.....	68
Tabela 20 - Resumo das características dos três cenários possíveis.....	72

Lista de abreviaturas

AQS – Água Quente Sanitária

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

DC/AC – Conversor de corrente alternada para corrente contínua

EAU – Emirados Árabes Unidos

EUA – Estados Unidos da América

ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

GOR – Eficiência de produção de água

GW – Global Water Intelligence

HDH - Humidificação-Desumidificação

IGA – Investimentos e Gestão de Água

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MED – Evaporação Múltiplo Efeito

MSF – Evaporação Multi-Efeito Flash

OI – Osmose Inversa

PNA – Plano Nacional da Água

PNUEA – Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água

PRODES – Desenvolvimento de Energias Renováveis para Produção de água através de Dessalinização – Projecto EU

SDT – Sólidos dissolvidos totais

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

UNDESA – United Nations Department of Economic and Social Affairs

UNEP – United Nations Environment Programme

WHO – World Health Organization

ZLD – Zero Liquid Discharge

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Enquadramento do tema

A água é um recurso essencial para a existência humana e dos diferentes ecossistemas, sendo fundamental para o desenvolvimento económico, social e ambiental. É um elemento nuclear para a regulação climática do planeta, através do ciclo hidrológico e da circulação atmosférica global, contudo durante muito tempo persistiu a ideia de que a água era um recurso infinito.

Porém, tem-se tomado consciência de que a água, embora seja um recurso renovável, é também um recurso limitado, devido ao crescimento da população, mudança do estilo de vida, poluição e uso ineficiente da água, limitando o acesso em quantidade e qualidade em algumas regiões do planeta.

A escassez de água tem aumentado drasticamente nas últimas décadas a nível mundial, sendo mais evidente nas regiões áridas e semiáridas, que coincidem muitas vezes com países em desenvolvimento.

A dessalinização de água do mar, ou de água salobra, é uma alternativa viável, em alguns países, para o fornecimento de água para uso humano. Considera-se, portanto, que o desenvolvimento de tecnologias de baixo custo, descentralizadas e autónomas, que utilizem as energias renováveis, nomeadamente por via solar, possa suprir as necessidades de pequenas comunidades próximas da costa ou situadas em zonas onde ocorre intrusão salina. No entanto, é necessário que sejam asseguradas a sustentabilidade ambiental e económica do abastecimento e a rentabilidade do recurso renovável.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo global

O objetivo global desta dissertação é avaliar o potencial de hibridação de sistemas de dessalinização por energia solar, sendo esta uma alternativa de fornecimento de água de forma descentralizada e autónoma e, para uso e consumo humano em regiões do planeta com défice de abastecimento seguro e de qualidade.

1.2.2. Objetivos específicos

Com o intuito de se atingir a sustentabilidade ambiental e o incremento da utilização de energias renováveis, procura-se com este trabalho identificar o estado de desenvolvimento de tecnologias que assegurem o acesso à água potável às populações costeiras, quer em termos de descentralização do abastecimento, quer em autonomia energética e segurança da qualidade da água, através de sistemas de dessalinização por energia solar, quer por via da conversão térmica quer por via da conversão fotovoltaica.

Neste âmbito, entre as diversas tecnologias desenvolvidas e em desenvolvimento, este trabalho irá dedicar-se essencialmente a dois processos de dessalinização: o de humidificação-desumidificação (HDH) por convecção natural e via solar térmica, existente em protótipo no LNEG e o de osmose inversa (OI) de baixa pressão por via elétrica, existente em instalação piloto no LNEG, que se pretenderá simular por via solar fotovoltaica.

Associado ao processo de dessalinização por via da humidificação-desumidificação, existe normalmente um impacte ambiental do concentrado, que se encontra aquecido, podendo provocar alterações no ecossistema aquático, além de ser parte da ineficiência do processo térmico, ocorrendo também no sistema de osmose inversa, quando a descarga de pressão não é aproveitada.

Pretende-se assim apresentar as vantagens e as limitações da utilização separada destes dois sistemas de dessalinização bem como as vantagens e as limitações da sua hibridação, com vista a uma possível melhoria da eficiência de produção de água e minimização do impacte ambiental do concentrado.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação está disposta em cinco capítulos, sendo que o Capítulo 1 – Introdução inclui o enquadramento do tema e os objetivos global e específicos. O Capítulo 2 – Estado de Arte consiste numa revisão bibliográfica com base em documentos efetuados até à data, de modo a fundamentar o conteúdo da problemática. O Capítulo 3 – Atividade Experimental abrange uma descrição do protótipo de humidificação-desumidificação, do piloto de osmose inversa e respetivos trabalhos experimentais. O Capítulo 4 – Análise comparativa de sistemas de dessalinização compreende a apresentação e discussão dos cenários propostos, com o objetivo de hibridação do sistema de HDH com reciclagem de concentrado, com o sistema de OI. Por fim, o Capítulo 5 – Conclusões expõe as conclusões da dissertação e ainda, perspetivas futuras.

Capítulo 2 - Estado da Arte

2.1. Problemática da escassez de água no planeta

A água é um dos recursos mais abundantes no planeta, sendo essencial no desenvolvimento económico, social e ambiental. O planeta Terra é constituído por 75 % de água e por 25 % de superfície terrestre. A maioria da água existente no planeta é salgada (97,5 %) e encontra-se presente nos mares e oceanos, enquanto que a água doce representa apenas 2,5 % do total (FAO 2007).

Na figura 1 é possível observar que, dos 2,5 % da água doce, a grande maioria encontra-se no estado sólido (68,9 %), sendo que cerca de 30,8 % representa a água subterrânea e que, apenas 0,3 % é água superficial.

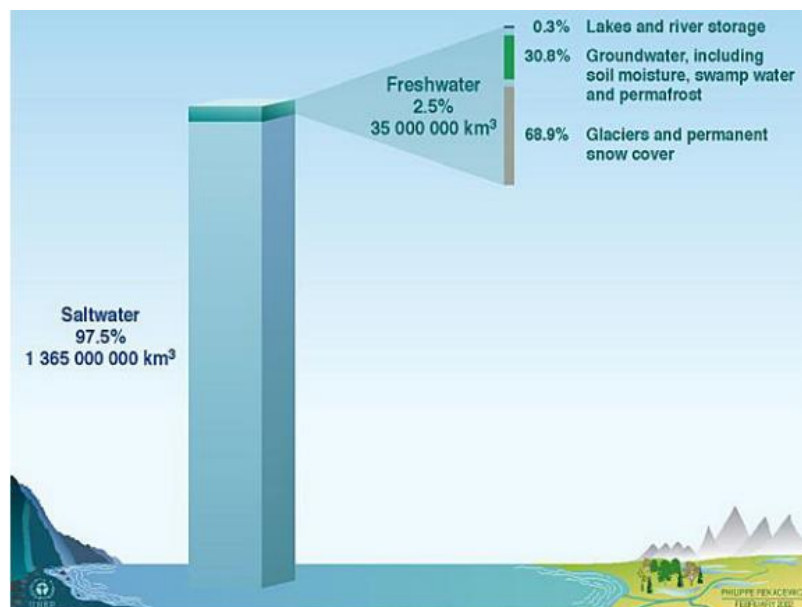


Figura 1 - Distribuição de água no planeta (UNEP, 2008)

A distribuição dos recursos de água doce não é uniforme no globo terrestre (figura 2), dependendo não só dos padrões do clima e precipitação, como também das próprias estruturas geológicas (Leusbrock, 2011).

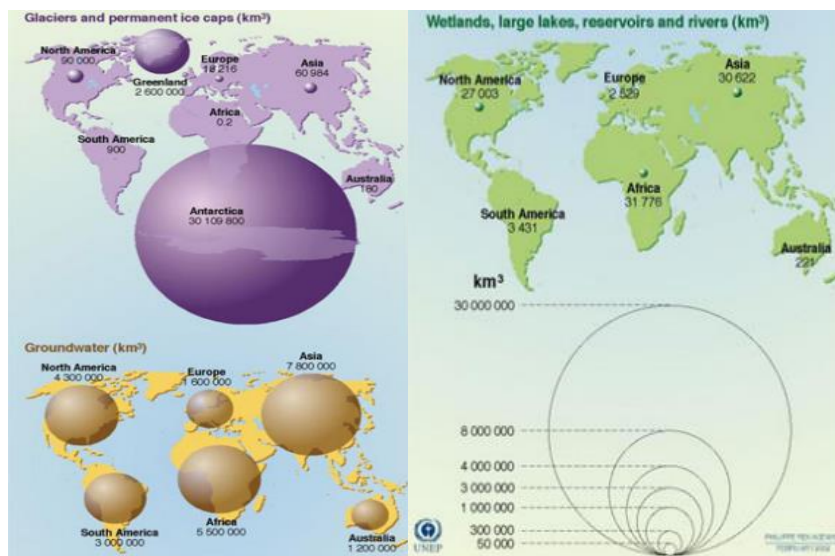


Figura 2 - Recursos de água doce existentes no planeta, por continente (Shiklomanov, 2003)

Assim, é possível constatar que existem grandes diferenças entre as quantidades de água para consumo entre países de todo o mundo como se pode verificar na figura 3.

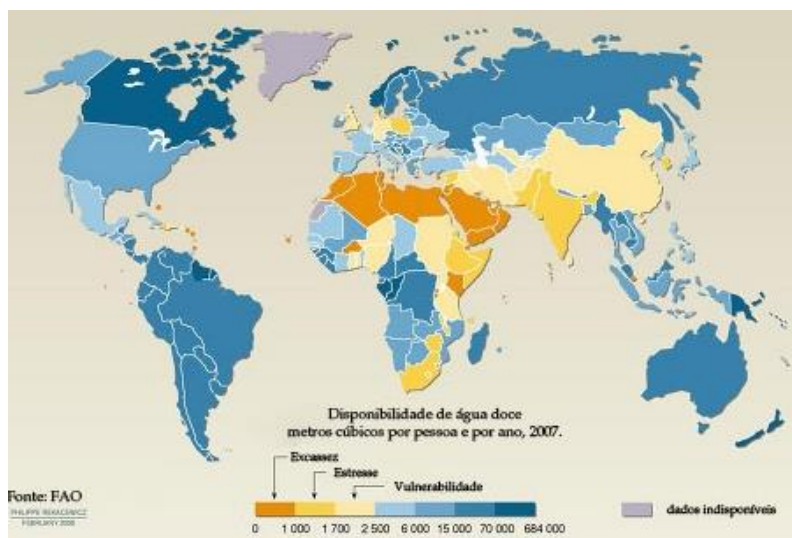


Figura 3 - Disponibilidade de água no Mundo (FAO, 2007)

A partir das figuras 2 e 3 constata-se que a distribuição e a disponibilidade de água doce no mundo variam de acordo com a região, sendo um recurso escasso em alguns locais. Assim, existem regiões onde há uma grande abundância de água, chamadas de regiões autossuficientes, e outras, na qual a água não chega de igual modo, chamadas regiões deficitárias em água podendo mesmo, essa deficiente distribuição, conduzir a conflitos e a luta pela sobrevivência.

No que diz respeito às zonas tropicais e equatoriais, a água existe em abundância pois existem condições que permitem a sua existência no estado líquido. Enquanto que no Equador, a água vai sendo cada vez mais escassa devido às temperaturas quentes, acontecendo o mesmo nas zonas desérticas onde as altas temperaturas e a ausência de humidade em conjunto, provocam escassez de água.

A água é utilizada para diversos fins, como na atividade agrícola que é a maior consumidora de água em todo o mundo, onde cerca de 85 % de toda a água consumida é utilizada para a irrigação de terrenos agrícolas, sendo preponderante na produção e distribuição de produtos animais e vegetais.

No uso doméstico, a água é utilizada para uma grande variedade de atividades diárias, como também atividades comerciais e industriais. Nos países mais desenvolvidos, quantidades substanciais de água disponível são usadas para produção de energia. Para além de todos estes fins, a água também é utilizada pelo ecossistema, sendo que o uso desta água não está diretamente ligado ao dia-a-dia, mas contribui para manter o ecossistema em equilíbrio para o bem-estar do ser humano.

A figura 4 apresenta o consumo e a extração de água ao longo dos anos para cada setor.

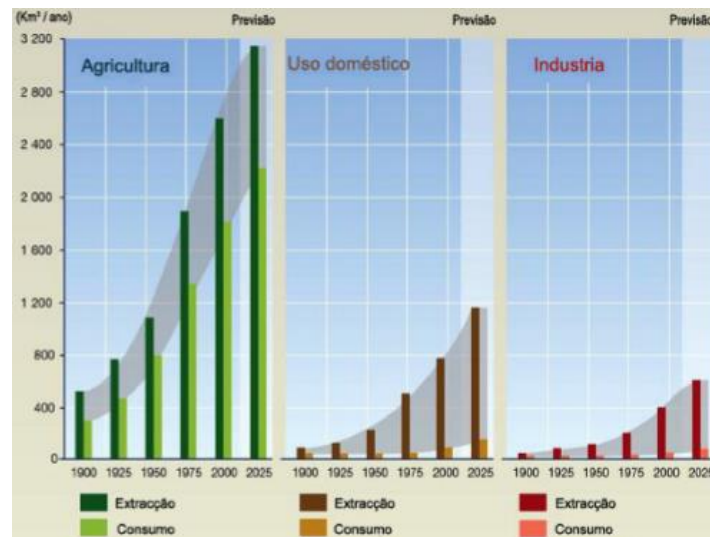


Figura 4 - Consumo e extração de água ao longo de vários anos por sectores (agrícola, doméstico e industrial) de 1900 a 2025 (Shiklomanov, 1999)

Para além das desigualdades a nível global existem grandes diferenças no consumo de água entre os países desenvolvidos e os em desenvolvimento. Nos países desenvolvidos existe uma maior capacidade económica, fazendo com que a acessibilidade de água seja mais fácil, incitando o desperdício, podendo resultar na sua escassez.

Os países em desenvolvimento, em regra, têm uma menor capacidade económica e muitos deles não têm meios para fornecer as suas populações com água em boas condições (Relatório do Desenvolvimento Humano 2014).

A escassez de água, sendo um conceito abstrato para muitos e uma dura realidade para outros, é definida pela UNDESA como o ponto em que o impacto conjunto de todos os utilizadores colide com o fornecimento ou a qualidade da água na medida em que, a procura por todos os sectores, incluindo o ambiente, não pode ser satisfeita plenamente, o que pode resultar num maior esgotamento e deterioração dos recursos de água existentes.

Com o crescimento exponencial da população existe uma maior procura de água e um aumento da poluição deste recurso, devido à expansão das áreas urbanas. As alterações climáticas, incluindo secas ou inundações, põem em causa a regularidade da recarga de aquíferos e das águas superficiais (UNDESA 2014).

A exploração insustentável dos recursos hídricos constitui uma ameaça crescente para o desenvolvimento humano, produzindo uma dívida ecológica insustentável que será transferida às gerações futuras. Estima-se que cerca de 25 % da população mundial não tem água doce disponível e, como tal, não tem forma de suprir as suas necessidades básicas de sobrevivência. Muitos países já se encontram com graves problemas de escassez de água, prevendo-se que no futuro, outros países terão que se deparar com essa realidade, principalmente a nível regional e local, onde a disponibilidade deste recurso é menor (Mathioulakis, 2007; Laranjeira, 2010; Penate, 2012).

2.1.1. Escassez de água em Portugal

A situação geográfica do território de Portugal Continental é favorável à ocorrência de episódios de seca, tendo consequências desastrosas na agricultura e na pecuária, nos recursos hídricos e no bem-estar das populações. Em particular, as regiões a Sul do Tejo são as mais suscetíveis e as mais afetadas (Pires *et al.* 2010).

Apesar da variabilidade da disponibilidade de água ser elevada, a taxa de fornecimento de água ao domicílio em Portugal é elevada (95 %), sendo que o país apresenta, em termos médios, mais de 2 dias de capacidade de reserva de água tratada para consumo humano.

Assim, na eventualidade de haver um problema no sistema de abastecimento a jusante de um reservatório, em geral é possível manter o abastecimento de água às populações durante pelo menos dois dias. Todas as zonas de Portugal Continental têm, em média, uma capacidade de reserva acima do recomendado, sendo maior na zona Norte, com cerca de 2/3 dias, e menor na zona Sul (Alentejo e Algarve), com cerca de 1,8 dias. (ERSAR, 2013).

A seca é o desastre natural de origem meteorológica e climatológica mais complexo e que afeta mais pessoas e durante mais tempo do que qualquer outro (Pires *et al.* 2010). Estes episódios têm-se tornado mais frequentes devido ao aumento das necessidades de água resultante do crescimento da população e da sua qualidade de vida.

De acordo com o Boletim Climatológico Mensal de agosto de 2015, Portugal atravessa a segunda pior seca dos últimos 70 anos. No que diz respeito ao índice de seca, mantém-se a situação de seca meteorológica, que se caracteriza pela falta de água que é induzida pelo desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, que se verifica desde março do mesmo ano. Constatase que cerca de 74 % do território nacional encontra-se em situação de seca severa a extrema (figura 5) (IPMA, 2015).

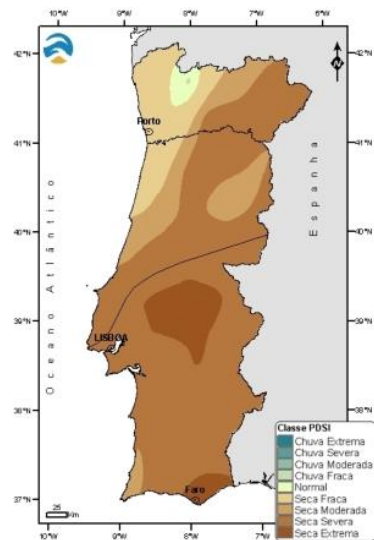


Figura 5 - Índice de seca meteorológica em agosto de 2015 (IPMA, 2015)

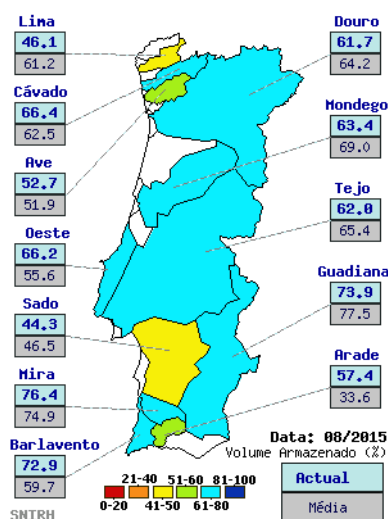


Figura 6 - Situação das albufeiras em agosto de 2015 (SNIRH, 2015)

Apesar de Portugal não apresentar grandes problemas nos sistemas de abastecimento de água, a escassez dos recursos hídricos, quer pelo aumento da temperatura quer pela falta de precipitação, irá afetar gravemente as reservas de água. Em agosto de 2015 verificou-se uma descida no volume armazenado em todas as bacias hidrográficas monitorizadas (figura 6).

Tendo em conta as 60 albufeiras monitorizadas, apenas 3 apresentaram disponibilidades hídricas superiores a 70 % do volume total e 2 têm disponibilidades inferiores a 40 % do volume total (SNIRH,2015). Assim sendo, é fundamental considerar a água salgada, após ser tratada, como um recurso viável para o consumo humano, aproveitando a vasta zona costeira do país.

Em 2010, Portugal possuía cerca de 10,6 milhões de habitantes, apresentando uma procura anual de água no território continental estimada em cerca de 4,199 milhões m³, no conjunto dos três setores: urbano, agrícola e industrial. Como se observa na figura 7, o setor agrícola é, em termos de volume, o maior consumidor (> 80 %) (PNUEA, 2012).

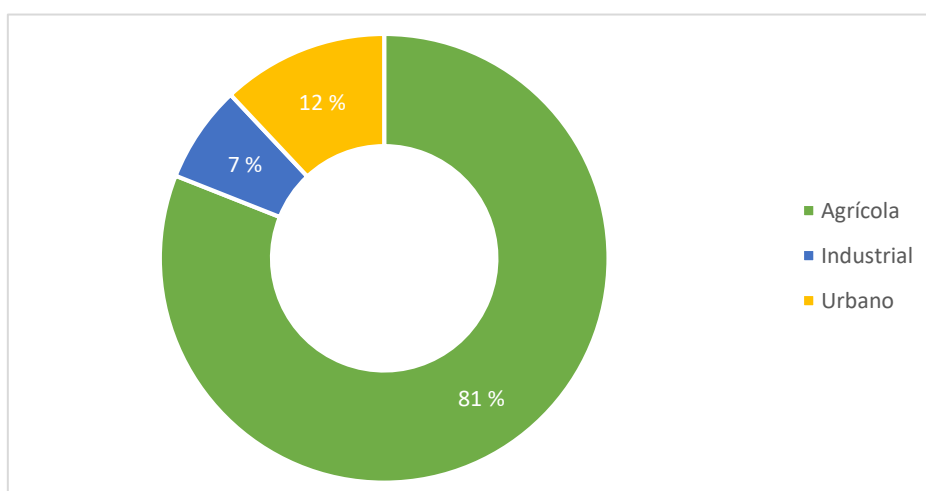


Figura 7 - Procura de água por setor em 2010 (PNA)

Tendo em consideração a situação atual mundial e a vasta costa portuguesa, existe a necessidade de se desenvolver formas de gestão dos recursos hídricos disponíveis e de se encontrar meios e tecnologias alternativas, que permitem ultrapassar as limitações de abastecimento hídricas. Algumas dessas formas de gestão passam pela limitação de utilização do recurso, ou pelo transporte de água das regiões em que esta abunda para zonas mais escassas (Laranjeira, 2010). Outras alternativas passam pela reutilização da água e/ou pelo tratamento da mesma de forma a garantir a qualidade mínima às comunidades, sendo a dessalinização da água salgada ou salobra uma das possíveis tecnologias alternativas para produzir água potável ou para utilização na agricultura.

2.2. Dessalinização

O ciclo hidrológico é um processo natural de dessalinização da água que utiliza a energia solar, comportando-se como um sistema físico, fechado, sequencial e dinâmico. A ação da energia solar permite que ocorra a evaporação de um grande volume de água dos oceanos, dos mares e dos continentes. Os sais permanecem na solução e os vapores, por condensação, vão formar as nuvens, que originam as chuvas e outras formas de precipitação. Esta água doce volta aos oceanos e mares, por gravidade, alimentando os rios, os lagos e as lagoas, voltando a assimilar uma nova carga salina, permitindo que todo o ciclo continue (figura 8) (Shatat, M., *et al.*, 2013).

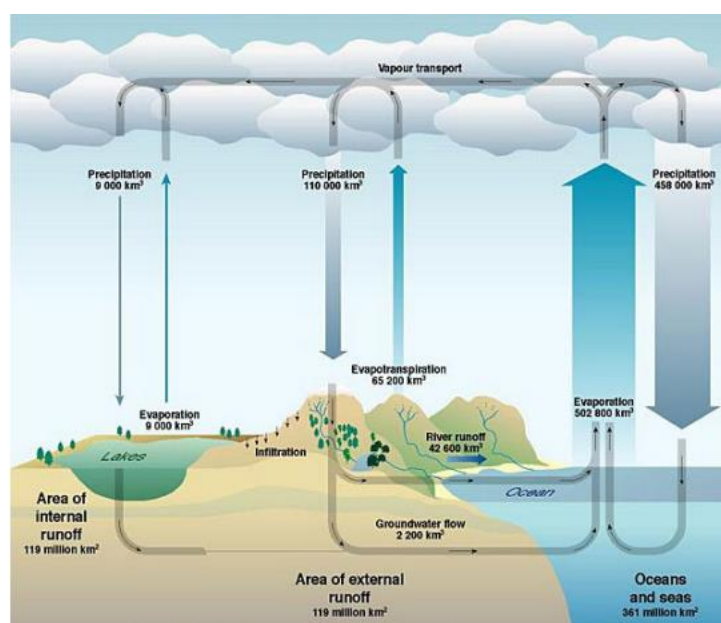


Figura 8 - Ciclo Hidrológico (UNEP, 2008)

Sabendo que os oceanos possuem uma elevada concentração de sais e visto que são uma das fontes quase inesgotáveis que existem no planeta, desenvolveram-se métodos e técnicas de dessalinização a partir destas fontes, de modo a combater a escassez de água no mundo.

A dessalinização é um processo pelo qual a água salgada ou salobra é tratada com vista à remoção de sais minerais, resultando uma água potável, tornando-a numa solução competitiva e viável para fornecer água em muitos países (Shatat, M., *et al.*, 2013).

A figura 9 apresenta o esquema do processo de dessalinização.

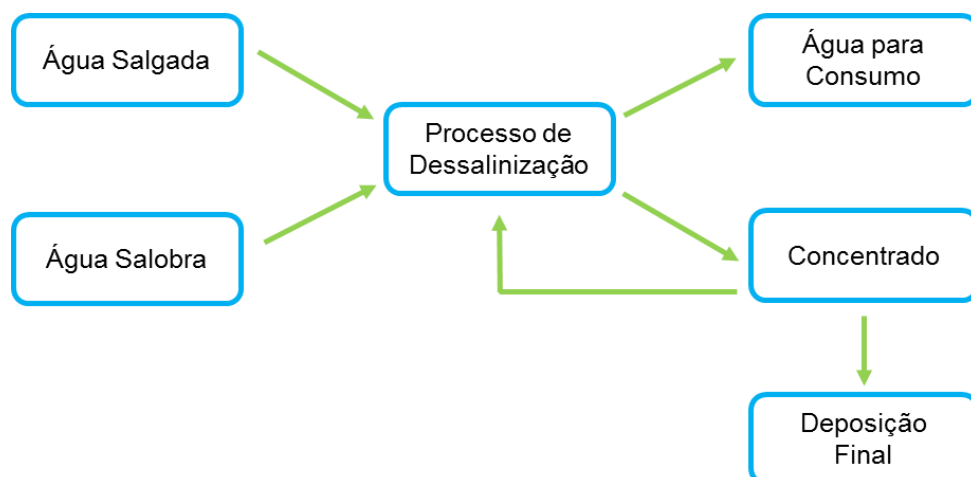


Figura 9 - Esquema Geral do Processo de Dessalinização (adaptado de Levy, 2008)

A capacidade mundial instalada para dessalinização de água é de cerca de 95 Mm³/dia, onde 36 Mm³/dia estão instaladas na região do Golfo, representando cerca de 38 % da capacidade global de dessalinização da água, e 59 Mm³/dia no resto do mundo (figura 10). A região do Golfo tem uma grande representação mundial de dessalinização devido à abundância das maiores reservas de petróleo do mundo, com uma elevada escassez de recursos de água potável (Shatat *et al.*, 2013).

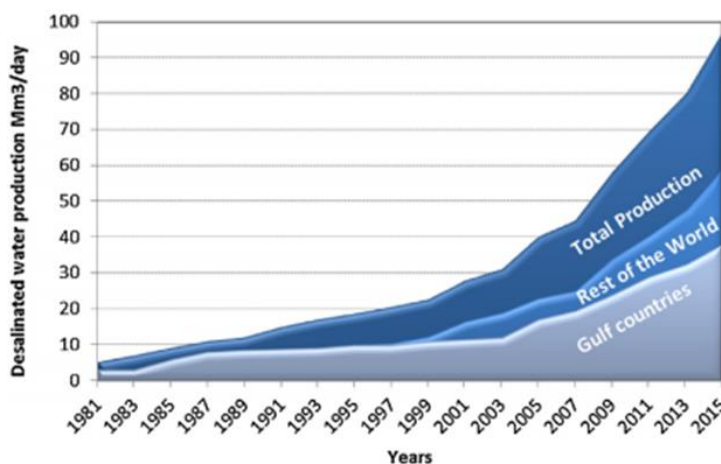


Figura 10 - Crescimento mundial do mercado da dessalinização (Shatat, M., et al., 2013)

De acordo com a figura 11, a Arábia Saudita, os Emirados Árabes Unidos, os EUA, a Espanha e a China têm a maior capacidade de dessalinização, embora a Índia e Israel tenham registado um crescimento significativo desde 2002 (Shatat, M., *et al.*, 2013). Estas instalações de dessalinização são vitais para o desenvolvimento económico em países com baixos recursos de água doce (GWI, 2006).

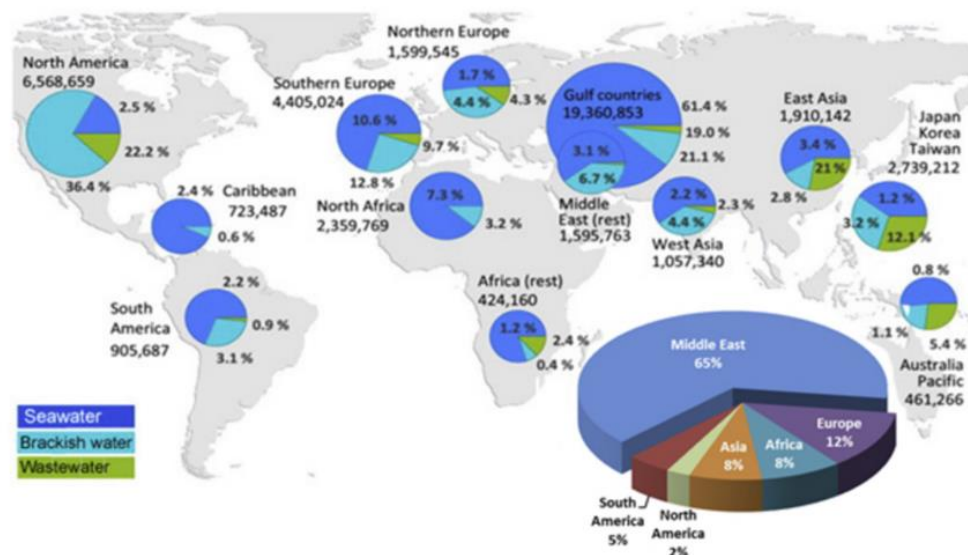


Figura 11 - Distribuição global da capacidade mundial de dessalinização (Lattemann *et al.*, 2010).

O processo de dessalinização tem sido utilizado durante anos nas regiões mais áridas do Médio Oriente, no entanto, cada vez mais regiões estão a explorar o uso da dessalinização como uma potencial fonte de fornecimento de água, exemplo disso são países como a Austrália, a China e zonas costeiras da Califórnia. É de referir que existem ilhas, não representadas na figura 11, que dependem da dessalinização em grande percentagem das suas necessidades de água como as Ilhas do Arquipélago de Cabo Verde.

Mundialmente, cerca de 63 % da atual capacidade de dessalinização de 44,1 milhões de metros cúbicos por dia é produzido a partir da água do mar, 19 % da água salobra, e 5 % a partir de fontes de águas residuais (Lattemann *et al.*, 2010).

2.2.1. Etapas no tratamento de água dessalinizada

Independentemente do tipo de tecnologia usada na dessalinização, existem etapas comuns que ocorrem numa unidade de dessalinização (figura 12). Essas etapas são (National Research. C, 2008):

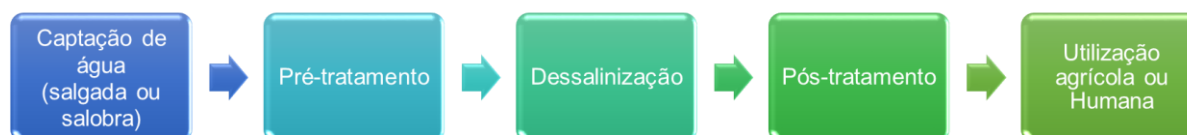


Figura 12 - Linha convencional de tratamento de água por dessalinização

A água captada, que pode ter origem superficial (oceanos, rios, etc.) ou subterrânea (aquíferos, poços, etc.), sofre um pré-tratamento com vista à remoção de sólidos em suspensão, de modo a evitar problemas de colmatção nos equipamentos. Esta fase tem como objetivo principal garantir que os compostos presentes na água não diminuam o rendimento da dessalinização. A exigência do pré-tratamento depende da qualidade da água captada, bem como do tipo de processo de dessalinização escolhida. A água, após um correto pré-tratamento, não deve apresentar elementos com potencial oxidante, deve apresentar sim, um baixo potencial de incrustação orgânica, baixa concentração de sólidos dissolvidos totais e de metais pesados e ainda, reduzida atividade biológica (Levy, 2008).

Como se apresenta na tabela 1, o processo de pré-tratamento poderá incluir cinco etapas.

Tabela 1 - Etapas do processo de pré-tratamento (Mickley et al. 1993)

Etapas	Objetivo	Químicos Adicionados	Destino dos Químicos
Neutralização	Redução da concentração dos carbonatos	Ácido Sulfúrico	Concentrado
Anti Incrustações	Prevenção de incrustações nas membranas	Agentes dispersantes	Concentrado
Coagulação/Floculação	Remoção de partículas coloidais e sólidos suspensos	Coagulantes - Floculantes	Flocos formados são removidos por filtração
Desinfecção	Remoção de microrganismos das membranas	Cloro	Produtos finais
Remoção do cloro	Proteção das membranas	Bissulfato de sódio ou granulado de carvão ativado	Cloro e sulfatos presentes no concentrado

A água pré-tratada é sujeita ao processo de dessalinização, com o objetivo de separar os sais dissolvidos e outros constituintes. Obtém-se a água doce (destilado ou permeado) e o subproduto (concentrado).

O permeado obtido sofrerá um pós-tratamento, antes do armazenamento ou distribuição, que consiste na adição de produtos químicos para evitar a corrosão das tubagens a jusante. Nesta fase é também feita a estabilização da água produzida, através da remoção de gases, ajuste de pH e desinfecção.

Como se apresenta na tabela 2, o processo de pós-tratamento é, geralmente, caracterizado por cinco etapas.

Tabela 2 - Etapas do processo de pós-tratamento (Mickley et al. 1993)

Etapas	Objetivo	Químicos Adicionados	Destino dos Químicos
Arejamento	Remoção de CO ₂ e H ₂ S	-----	Oxidação do H ₂ S e NH ₄ (presente na água e no concentrado)
Neutralização	Prevenção da corrosão do sistema de distribuição	-----	Água e Concentrado
Desinfecção	Prevenção de proliferação bacteriológica no sistema de distribuição	Cloro	Água e Concentrado
Redução dos Níveis de Cloro	Eliminação de Cloro e outros Oxidantes	Bissulfito de Sódio ou Granulado de Carvão Ativado	Água
Oxigenação	Aumento dos níveis de oxigénio dissolvido através do arejamento	-----	-----

2.2.2. Processos de dessalinização

O processo de dessalinização de água salgada ou salobra pode ocorrer através do uso de membranas ou por via térmica.

A figura 13 resume esquematicamente os diferentes processos de dessalinização.

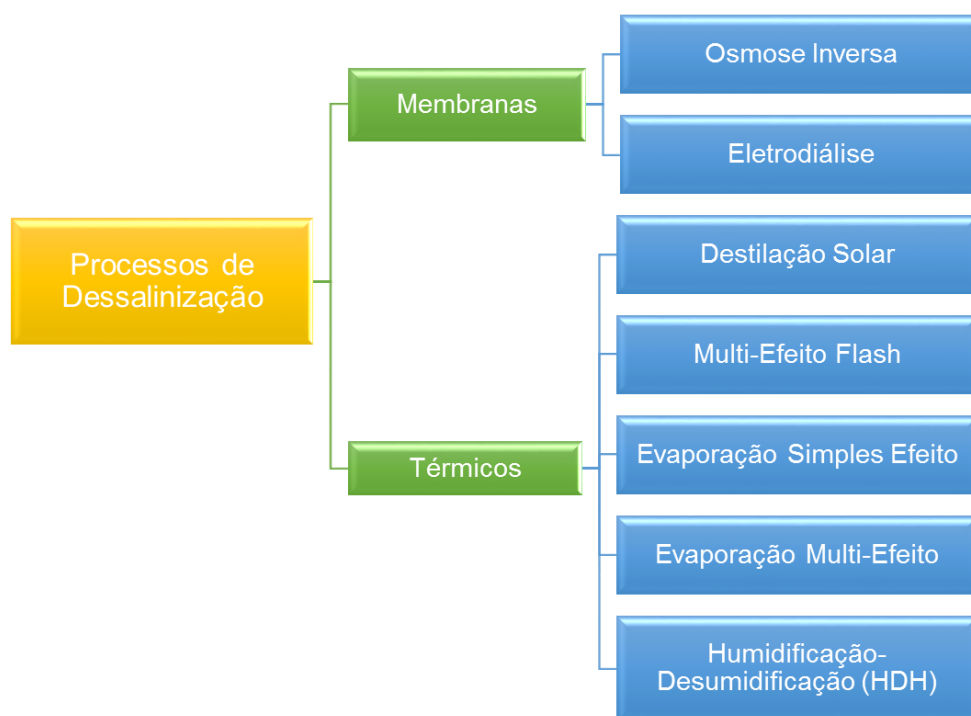


Figura 13 - Processos de dessalinização (adaptado de Gorjian et al., 2015)

Processos de separação por membranas

O processo de dessalinização através de membranas consiste na separação de sais presentes na água, recorrendo ao uso de membranas semipermeáveis, que produzem uma solução com baixa salinidade e um concentrado com elevada salinidade.

As tecnologias de membranas mais utilizadas para a dessalinização são a Osmose Inversa e a Eletrodiálise.

Osmose Inversa

A Osmose Inversa consiste na separação dos sais que se encontram na água, a pressões superiores à pressão osmótica (através de uma bomba de alta pressão). Neste processo, a água atravessa a membrana semipermeável, no sentido da solução mais diluída, e os seus sais e outros contaminantes ficam retidos e são descarregados através da corrente de rejeição. A figura 14 apresenta um esquema de uma instalação de osmose inversa. Os parâmetros que definem o processo de Osmose Inversa encontram-se no anexo I.

Este processo será abordado de forma detalhada no capítulo 3, pois será um dos sistemas considerados na avaliação do potencial de hibridação do processo de dessalinização.

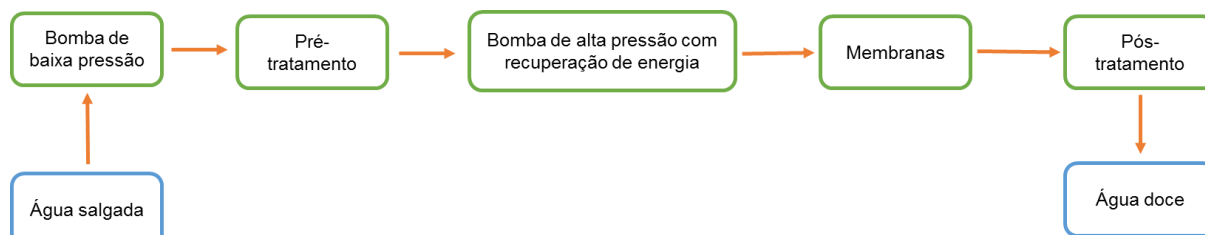


Figura 14 - Esquema de uma instalação de Osmose Inversa (adaptado de Semiat, R., 2000)

Eletrodiálise

A eletrodiálise consiste na aplicação da força eletromotriz nos elétrodos, permitindo a separação de sais que se encontram dissolvidos na água, íões positivos (Na^+) e íões negativos (Cl^-). Uma unidade de eletrodiálise é constituída por um eletrolisador com duas membranas (uma catiónica e outra aniónica), um eletrólito (água salgada) e dois elétrodos, um negativo e outro positivo.

Este é um método de separação eletroquímica em que os íões são transferidos sobre membranas seletivas de íões (Levy, 2008).

Processos por via térmica

Genericamente, o processo de separação térmico é auxiliado por uma fonte de calor, que pode ser fornecida através de combustíveis fósseis ou energias renováveis, como a energia solar.

Os principais processos de dessalinização são a Destilação Solar, a Evaporação Efeito Simples, a Evaporação Multi-Efeito, a Evaporação Multi-Efeito Flash e por fim, a Humidificação-Desumidificação (HDH).

Destilação solar

A destilação solar é a tecnologia de dessalinização mais simples, a qual utiliza o princípio do efeito de estufa para evaporar a água salgada. A água a dessalinizar encontra-se em tanques cobertos por vidro ou outro tipo de material transparente, permitindo a entrada da luz solar, promovendo o aumento da temperatura da água e a sua consequente evaporação. A acumulação de vapor no interior irá condensar e a água escoar através de pontos de recolha. Assim, ocorre uma separação da água, dos sais minerais e impurezas, transformando-a em água potável. Este método consegue produzir cerca de 3,5 L de água potável por dia/m^2 (Shatat, M. et al., 2013).

Evaporação Multi-Efeito

O processo de Evaporação Multi-Efeito é constituído por evaporadores em série, os efeitos, cuja função é elevar a temperatura até à de ebulição, e por uma unidade de produção de vapor. Este processo inicia-se pela aspersão da água salgada fria sobre o exterior de um conjunto de tubos quentes, que são aquecidos inicialmente, recorrendo a uma fonte de calor externa. O vapor que circula ao longo dos tubos condensa, sendo captado, tratado e comercializado como água doce.

Utiliza o calor latente da condensação do vapor gerado no primeiro efeito ($T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) para alimentar o efeito seguinte, permitindo a múltipla evaporação sem a necessidade de adicionar mais calor para além da primeira câmara (Kalogirou, 2009).

A cada efeito é injetada água salgada que condensará o vapor gerado no efeito anterior, o concentrado é recuperado e introduzida no efeito seguinte. Uma central com produção industrial pode conter entre 4 a 21 efeitos (Akili D., 2008)

Evaporação Multi-Efeito Flash

A evaporação Multi-Efeito Flash, ou também designada de evaporação instantânea, consiste na ebulição da água em etapas sucessivas, onde é controlada a pressão e a temperatura. Neste método recorre-se a um conjunto de evaporadores com pressões ligeiramente menores entre eles. A diminuição da pressão entre evaporadores proporciona imediatamente a ebulição da água à medida que esta atravessa cada um dos evaporadores. Este rápido processo de ebulição induz uma imediata evaporação da água salgada ou, literalmente, a uma evaporação flash. O vapor sobe até aos condensadores, arrefecendo depois ao longo de vários tubos onde circula o concentrado. A água doce é conduzida para o exterior da câmara e o concentrado é enviado para o meio recetor ou para destino final.

Humidificação-Desumidificação

A tecnologia de Humidificação-Desumidificação (HDH) baseia-se na capacidade do ar se misturar com grandes quantidades de vapor de água. A capacidade de absorção do ar durante a humidificação depende da temperatura da mistura, sendo que, quanto maior for a temperatura maior será a sua capacidade de absorção de água.

Uma instalação de HDH possui três elementos principais, um evaporador (humidificador), um condensador (desumidificador) e uma fonte de calor (energia solar térmica). O seu funcionamento consiste no contato direto da água salgada com uma corrente de ar que circula entre o evaporador e o condensador. Este sistema aproveita o calor latente proveniente das fases anteriores.

A figura 15 apresenta o esquema do funcionamento do processo de humidificação-desumidificação.



Figura 15 - Princípio de funcionamento do processo de humidificação-desumidificação (Narayan et al., 2010)

Os sistemas de HDH podem ser classificados em três categorias, a fonte de energia utilizada para o aquecimento (solar térmica, geotérmica ou sistemas híbridos), os sistemas de aquecimento e a configuração do ciclo.

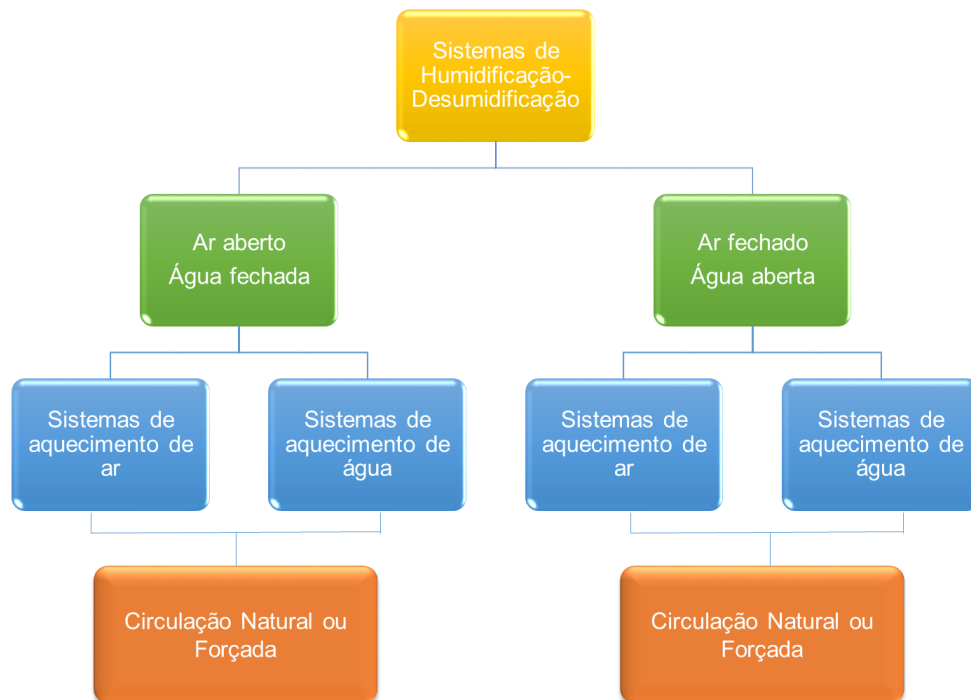


Figura 16 - Classificação dos processos de humidificação-desumidificação baseados na configuração do ciclo (Narayan et al., 2010)

É possível verificar, a partir da figura 16, que existem vários sistemas, sendo que o que vai ser pormenorizado é o sistema Humidificação-Desumidificação de ar fechado, água aberta de água aquecida, sendo que os restantes são apresentados em anexo.

Neste sistema, a água salgada, à temperatura ambiente, entra no condensador, onde é pré-aquecida. Posteriormente, esta é aquecida pelo coletor solar, aumentando a eficiência da evaporação e segue para o evaporador onde é pulverizada no topo do mesmo. Como circula vapor aquecido no evaporador, a água pulverizada aquece e evapora, sendo este vapor de água transferido para o condensador, onde será colhido posteriormente como água destilada. Neste sistema, o ar que circula é sempre o mesmo, sendo humidificado e desumidificado durante o processo (figura 17).

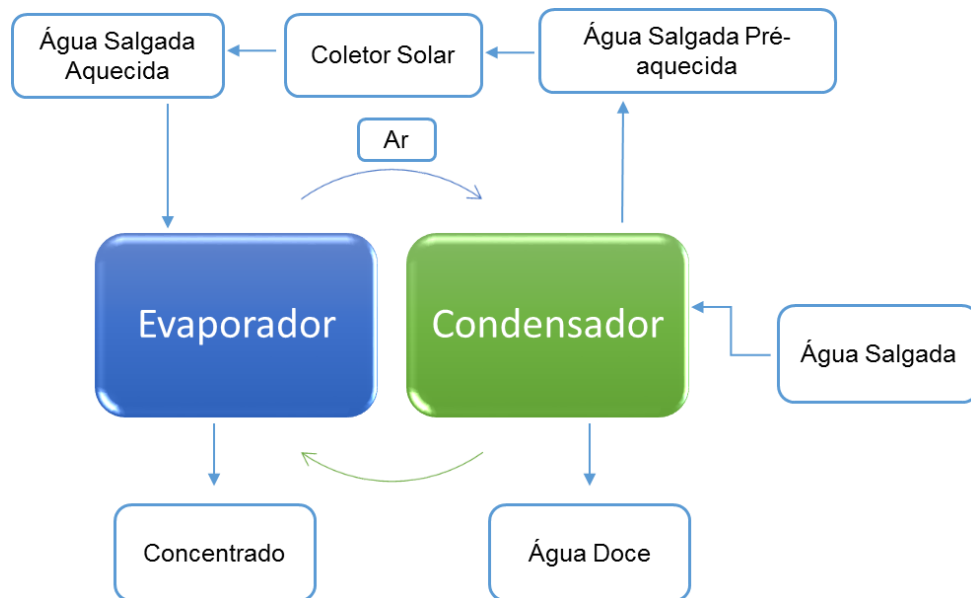


Figura 17 - Processo de funcionamento da tecnologia Humidificação-Desumidificação de ar fechado, água aberta de água aquecida (Narayan et al., 2010)

O processo de humidificação-desumidificação é definido pelos seguintes parâmetros:

- ✓ Taxa de Conversão Mássica (TXC) – razão entre a água destilada obtida e a água salgada introduzida no sistema (Moreira et al., 1994).

$$TXC = \frac{\dot{m}_{destilado}}{\dot{m}_w} \times 100 [\%]$$

- ✓ Consumo Específico de Energia (QM) – energia despendida no sistema para aquecer a água salgada por unidade de massa de destilado produzido (Moreira et al., 1994).

$$QM = \frac{\dot{E}_i}{\dot{m}_{destilado}} [kJ/kg]$$

✓ Gained-Output-Ratio (GOR) – parâmetro de performance energética para sistemas de dessalinização que caracteriza a eficiência de produção de água e a quantidade de calor latente recuperado pelo sistema. Para os sistemas de HDH, deve ser obtido um GOR de pelo menos oito (Narayan, G.P., *et al.*, 2010).

$$GOR = \frac{\dot{m}_{destilado} \cdot L_f}{\dot{E}_i}$$

Atualmente, existem a nível mundial várias configurações de HDH e OI comerciais que vão ao encontro das características de abastecimento de água dessalinizada de pequena escala, de distribuição descentralizada e autonomia de energia, de forma a serem utilizados com energias renováveis.

Na tabela 3 reúne-se o resultado da pesquisa deste tipo de sistema, abrangendo configurações de HDH e OI com características muito semelhantes, que se definem na ordem de produção desde 1 m³/dia até várias dezenas, com consumo específico de energia variável em função das tecnologias.

Estes sistemas apresentam características particulares a pequena escala, não deixando de garantir a qualidade de abastecimento de água para consumo humano, baseado na taxa de conversão cerca de 20 a 75 %, na taxa de rejeição por volta de 99 %, no consumo específico de energia de fonte renovável para o HDH da ordem de 70 a 150 kWh/m³.

O equipamento mais conhecido é o TiNOX que está instalado em cenários de escassez de água como a Índia.

Tabela 3 - Equipamentos de dessalinização existentes no mercado

Equipamentos	Benefícios	Processos de dessalinização	Características
Ecostill	Baixo consumo de energia; Usa qualquer fonte de energia renovável (solar, geotérmica)	Humidificação-Desumidificação	Consumo médio de energia: 6 - 24 kWh Energia térmica: 70 - 150 kWh/m ³ efluente tratado Produção de destilado: 20 % Produção de concentrado: 80 % Produção: 200 - 50 000 m ³ /ano
TiNOX	Baixo custo de manutenção	Evaporação Multi-Efeito	Energia térmica: 100 kW/m ³ Produção de água: 1 – 50 m ³ /dia

Equipamentos	Benefícios	Processos de dessalinização	Características
Osmeo Easy 4"	Baixo custo de energia	Osmose Inversa	Taxa de conversão: 75 % Potência elétrica: 1,5 – 2,2 kW Taxa de rejeição: 99,1 % Produção de água: 300 – 1200 L/h
TSB 003	Elevada eficiência energética; Ideal para dessalinização descentralizada de água; Pode ser alimentada por energia solar	Osmose Inversa	Consumo de energia: 900 W Produção de água: 250 L/h

2.2.3. Qualidade da água para consumo humano

A água do mar e a água salobra são as principais fontes de água utilizadas para dessalinização por isso, é necessário o conhecimento das suas propriedades para um melhor desenvolvimento e conceção de sistemas de dessalinização

As propriedades físicas da água do mar são semelhantes às da água pura, podendo ser dependentes da temperatura e pressão.

Apesar da temperatura média da água do mar ser 15 °C, esta varia segundo a latitude do local, sendo que em Portugal Continental (latitude entre 36 ° e 43 °) a temperatura varia entre 20 e 23 °C (figura 18).

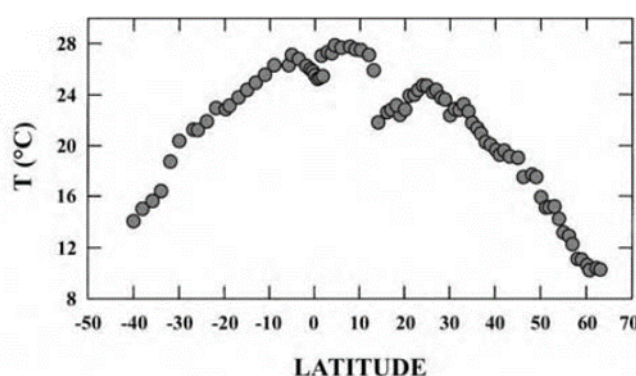


Figura 18 - Variação da temperatura da água do mar com a latitude (Kennish, M.J., 2001)

Um outro parâmetro conveniente para descrever a composição da água do mar é a salinidade, sendo esta definida em termos de condutividade elétrica, que em função da temperatura e salinidade varia entre 0,047934 S/cm (47,93 mS/cm) e 0,053088 S/cm (53,8 mS/cm) (figura 19).

$t/^{\circ}\text{C}$	$S = 5$	$S = 10$	$S = 15$	$S = 20$	$S = 25$	$S = 30$	$S = 35$	$S = 40$
0	0.004808	0.009171	0.013357	0.017421	0.021385	0.025257	0.029048	0.032775
5	0.005570	0.010616	0.015441	0.020118	0.024674	0.029120	0.033468	0.037734
10	0.006370	0.012131	0.017627	0.022947	0.028123	0.033171	0.038103	0.042935
15	0.007204	0.013709	0.019905	0.025894	0.031716	0.037391	0.042933	0.048355
20	0.008068	0.015346	0.022267	0.028948	0.035438	0.041762	0.047934	0.053968
25	0.008960	0.017035	0.024703	0.032097	0.039276	0.046267	0.053088	0.059751
30	0.009877	0.018771	0.027204	0.035330	0.043213	0.050888	0.058373	0.065683

Figura 19 - Condutividade elétrica da água do mar em função da temperatura e salinidade (Kennish, M.J., 2001)

A água do mar apresenta uma salinidade de cerca de 35 g/kg, onde existem variações consoante a latitude do local. Assim, em Portugal, a salinidade varia entre cerca de 35,7 e 36,5 g/kg (figura 20).

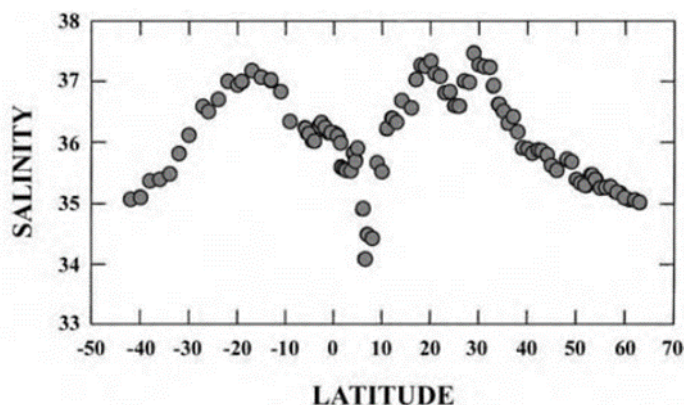


Figura 20 - Variação da salinidade da água do mar com a latitude (Kennish, M.J., 2001)

A condutividade elétrica da água do mar depende da temperatura e da salinidade, sendo ainda influenciada pelo tipo e proporção dos sais na solução. Os iões cloreto e sódio abrangem cerca de 86 % de todas as substâncias que se encontram dissolvidas na água do mar, concedendo-lhe a sua salinidade, correspondendo a teores de 1,05 g/L e 1,90 g/L respetivamente.

Os sais dissolvidos na água do mar dividem-se em principais (concentração da água do mar $> 1 \text{ mg/L} \approx 0,05 \text{ a } 75 \text{ mM}$) e secundários (concentração da água do mar $< 1 \text{ mg/L} \approx 0,05 \text{ mM}$), (tabela 4).

Tabela 4 - Composição da água do mar (Bebianno, 2007)

Categoria	Exemplos	Concentração
Iões Principais	Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+	nM
Iões Secundários	HCO_3^- , Br^- , Sr^{2+} , F^-	μM
Gases	N_2 , O_2 , Ar, CO_2 , N_2O , $(\text{CH}_3)_2\text{S}$, H_2S , H_2 , CH_4	nM a mM
Nutrientes	NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , H_4SiO_4	μM
Metais	Ni, Li, Fe, Mn, Zn, Pb, Cu, Co, U, Hg	$< 0,05 \mu\text{M}$
Compostos orgânicos dissolvidos	Aminoácidos, ácidos húmicos	ng/l a mg/l
Colóides	Espuma, flocos	$\leq \text{mg/l}$
Partículas em Suspensão	Areia, tecidos mortos, organismos marinhos, dejetos	$\mu\text{g/l}$ a mg/l

Considerando o mesmo valor de salinidade, a uma pressão de 1 atm, as propriedades termoquímicas variam com a temperatura (figura 21), podendo ser útil o conhecimento destas características no processo de dessalinização através do protótipo HDH.

Temperature, °C	$C_p(\text{J/g/K})$	$C_v(\text{J/g/K})$	$10^3 h(\text{J/g})$	$-g(\text{J/g})$	$10^6 s(\text{J/g/K})$
0	3.9865	3.9848	-30.59	5.01	1.718
5	3.9842	3.9772	-17.18	5.10	1.735
10	3.9861	3.9691	-4.73	5.19	1.815
15	3.9912	3.9599	6.88	5.28	1.858
20	3.9937	3.9492	17.86	5.37	1.897
25	3.9962	3.9366	28.30	5.47	1.933
30	4.0011	3.9215	38.42	5.57	1.968
35	4.0031	3.9037	48.35	5.66	2.001
40	4.0039	3.8829	58.27	5.76	2.035

Note: C_p = specific heat capacity at constant pressure; C_v = specific heat capacity at constant volume; h = specific enthalpy; g = specific free energy; s = specific entropy.

Figura 21 - Propriedades termoquímicas da água do mar (Kennish, M.J., 2001)

Zonas costeiras

É necessário ter em consideração o local escolhido para a captação da água do mar a ser dessalinizada, visto que pode afetar a qualidade de água produzida, sendo a maior preocupação, para além do impacto no ambiente, o impacto do uso desta água na saúde humana (WHO, 2007).

A zona costeira pode ser genericamente definida como uma porção de território influenciada direta e indiretamente em termos biofísicos pelo mar (ondas, marés, ventos, biota ou salinidade) e que pode ter para o lado de terra largura tipicamente de ordem quilométrica e se estende, do lado do mar, até ao limite da plataforma continental (Gomes, 2007).

O fenómeno do afloramento costeiro (“upwelling”) e a Corrente Costeira de Portugal ocorrem ao largo da costa ocidental Portuguesa durante os meses de Verão (julho, agosto, setembro), tendo como consequência, para além do arrefecimento das águas, o seu enriquecimento em nutrientes (nitratos, fosfatos e silicatos).

Este enriquecimento ocorre porque as águas subsuperficiais, que estão a ser transportadas para a superfície, têm uma maior concentração desses sais do que as próprias águas da superfície, havendo uma grande quantidade de nutrientes a ser encaminhada para uma camada onde a radiação solar consegue penetrar, permitindo que haja condições ideais de alimento e luz para o desenvolvimento do fitoplâncton.

As regiões onde ocorre este fenómeno caracterizam-se por possuírem uma elevada produtividade primária (figura 22) devido ao aumento da quantidade de fitoplâncton, possibilitando o desenvolvimento de toda a restante cadeia alimentar, desde o zooplâncton até aos peixes e outras espécies marinhas que se alimentam do plâncton ou de outros peixes.

Area	Primary Production (g C/m ² /year)	World Ocean Area		Total Primary Production (metric tons of carbon/year)
		(km ²)	(%)	
Upwellings	640	0.36×10^6	0.1	0.23×10^9
Coasts	160	54×10^6	15.0	8.6×10^9
Open oceans	130	307×10^6	85.0	39.9×10^9

Figura 22 – Produção primária global em ecossistemas marinhos (Kennish, M.J., 2001)

A costa oeste de Portugal apresenta condições hidrodinâmicas que a colocam entre as zonas mais favoráveis para a diluição e dispersão de águas residuais sendo, por isso, uma região adequada para a localização de emissários submarinos (figura 23) (Santos *et al.*, 2011).

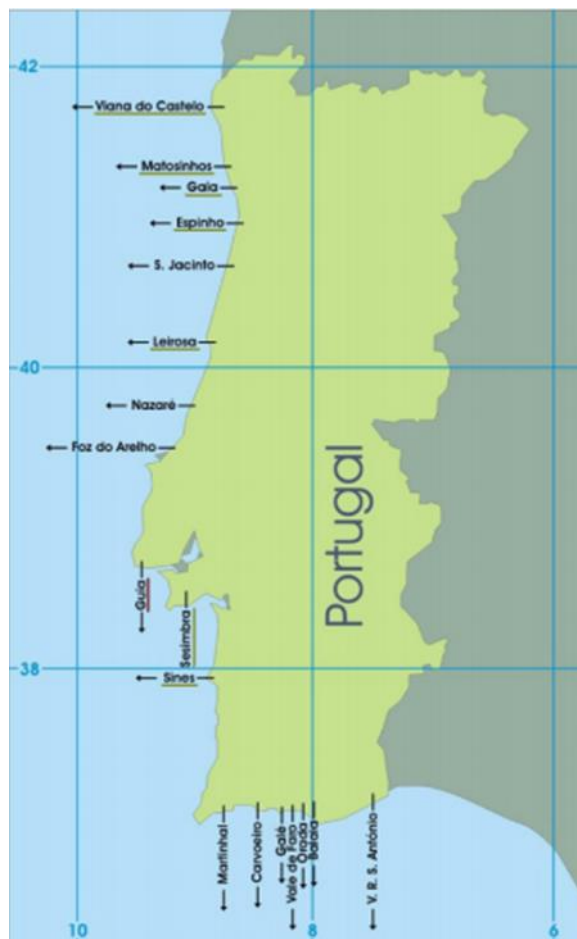


Figura 23 - Emissários submarinos da costa portuguesa (Santos *et al.*, 2011)

É de salientar que Portugal não possui nenhum documento que estabeleça parâmetros de qualidade para água que é captada para ser dessalinizada.

Exigências para a qualidade da água produzida

A água destinada para consumo humano é toda a água no seu estado original, ou após tratamento, destinada a ser bebida, a cozinhar, à preparação de alimentos, à higiene pessoal ou a outros fins domésticos, independentemente da sua origem e de ser fornecida a partir de uma rede de distribuição, de um camião ou navio-cisterna, em garrafas ou outros recipientes, com ou sem fins comerciais (DL n.º 306/2007 de 27 de agosto).

A qualidade da água para consumo humano é dada pelo conjunto de valores de parâmetros microbiológicos e físico-químicos fixados nas partes I, II e III do anexo I do presente decreto-lei e que dele faz parte integrante (DL n.º 306/2007 de 27 de agosto), sendo que esta tem de ser assegurada pelas entidades gestoras através de tratamentos adequados, bem como através de parâmetros microbiológicos, químicos e indicadores.

2.2.4. Impactes Ambientais

Para encontrar formas de mitigar as consequências negativas que resultam da dessalinização da água do mar, é essencial uma análise dos seus impactes. Assim sendo, é necessário identificar e avaliar os potenciais impactes que a unidade de dessalinização pode causar no local onde vai ser instalada.

Os impactes ambientais produzidos por uma unidade de dessalinização estão associados à escolha do local para a instalação da unidade de dessalinização, ao consumo de energia e à eliminação do concentrado.

Localização da unidade de dessalinização

A instalação deve estar localizada perto da origem de água (zona costeira) e do local onde se vai realizar a gestão do concentrado, assim a qualidade da água salgada não é comprometida e a distância à água do mar e ao local de gestão é minimizada, reduzindo-se o risco de poluição e contaminação do solo (Tsiourtis, 2001). Para o local de instalação ser o mais adequado do ponto de vista ambiental é necessário realizar-se um estudo de impacto ambiental.

Consumo de Energia

Os processos de dessalinização apresentam um consumo elevado de energia, onde na maioria das instalações de dessalinização são utilizados combustíveis fósseis, aumentando a emissão de gases de efeito estufa, com consequências nocivas para o ambiente.

Com o intuito de minimizar o consumo de energia e as emissões de gases de efeito de estufa, surge a utilização de energias renováveis, para suprir, em parte, as necessidades energéticas das instalações.

Eliminação do Concentrado

Do processo de dessalinização resultam dois fluxos, o concentrado salino (rejeitado com concentração de SDT superior a 36 g/L) e a água dessalinizada.

As características do concentrado dependem do tipo de processo a que se recorre e são definidas pela sua temperatura, densidade e salinidade (Younos, 2005). O aumento da salinidade no concentrado é uma característica comum a todos os processos de dessalinização, assim como, a temperatura que aumenta quando se recorre ao processo da destilação.

A composição do concentrado inclui os constituintes que são rejeitados da água de origem, de uma forma mais concentrada. O concentrado poderá conter resíduos de produtos químicos utilizados nos processos de pré-tratamento e pós-tratamento, tais como cloro, compostos orgânicos halogenados, metais pesados, entre outros, em proporções variáveis dependendo do tipo e necessidades do processo utilizado.

2.2.5. Gestão do concentrado

Geralmente, nas instalações de dessalinização, os resíduos do processo e o concentrado salino são descarregados no mar. Contudo, o concentrado poderá ter outros destinos finais.

A escolha do destino final a dar ao concentrado depende da quantidade e qualidade do mesmo, localização geográfica e natureza geológica do ponto de captação e do ponto de descarga do concentrado, custos de capital e operacionais e potenciais impactes ambientais (Xu *et al.* 2013).

Existem inúmeras opções para a gestão do concentrado, que incluem a descarga à superfície e submersa, a descarga numa estação de tratamento de águas residuais, no início ou no final do processo de tratamento, a descarga em poços profundos ou aquíferos, a descarga no solo, a técnica *Zero Liquid Discharge* (ZLD) e os lagos de evaporação (Voutchkov, 2014).

A figura 24 apresenta a percentagem de implementação das várias opções de gestão do concentrado.

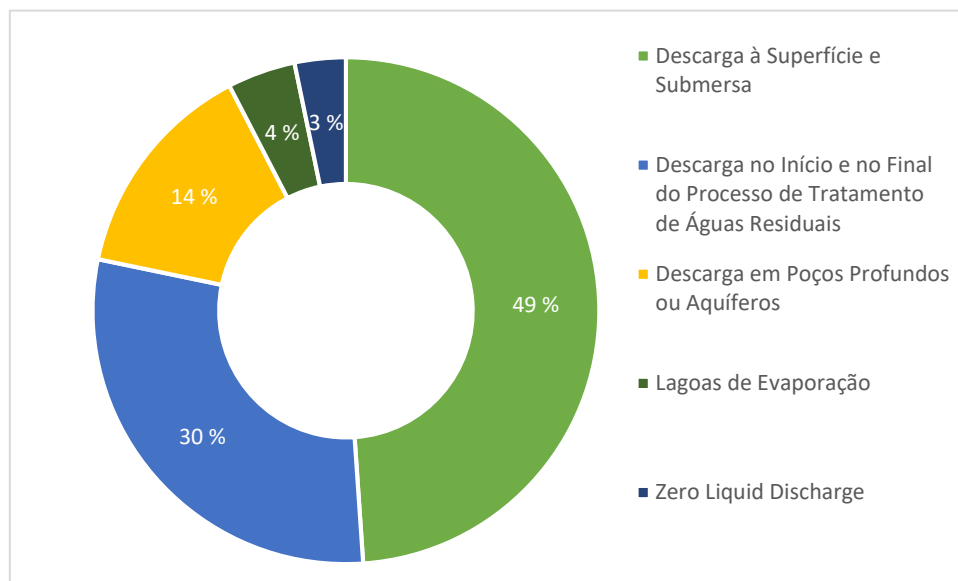


Figura 24 - Técnicas de gestão do concentrado (adaptado de Voutchkov, 2014)

Descarga à Superfície e Submersa

O destino final mais comum para o concentrado é a sua descarga em águas superficiais, nomeadamente em rios, águas costeiras, estuários e baías e ainda em lagoas ou lagoas.

Quando a descarga de concentrado é feita desta forma, à medida que o concentrado é recebido no meio recetor, forma-se uma pluma de elevada concentração salina. Dependendo da densidade do concentrado a descarregar, a pluma pode afundar, estabilizar ou mesmo flutuar.

Quando a diluição não é adequada, a pluma pode estender-se para além da zona de mistura definida, prejudicando o ecossistema. Uma zona de mistura define-se como uma zona onde os limites são quantificados no meio recetor, a partir do ponto de descarga, até onde se permite, legalmente, exceder os parâmetros de salinidade legalmente estabelecidos (Younos, 2005). É essencial que este tipo de descarga respeite regulamentos rigorosos de descarga em águas superficiais (Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro e Decreto-Lei n.º 226-A/2007 de 31 de maio)

A descarga submersa distingue-se da superficial, apenas por ocorrer afastada da costa e ser feita em profundidade.

Geralmente, as entidades reguladoras estabelecem zonas de mistura nas saídas do concentrado, tanto para a descarga superficial como para a submersa, a fim de controlar a salinidade da água do meio recetor. Neste caso, existe uma zona inicial de diluição estabelecida e uma zona de mistura, que é definida pela distância que a pluma atravessa até chegar aos fundos marinhos (Younos, 2005).

Descarga numa Estação de Tratamento de Águas Residuais

Uma das possibilidades que existem para a descarga do concentrado é a sua descarga em estações de tratamento de águas residuais (Mickley, 2001).

A maior limitação desta opção é, se o volume do concentrado for elevado, o nível de SDT no efluente pode ter um impacto significativo no processo de tratamento biológico, prejudicando a eficiência do tratamento (Younos, 2005). Para evitar este inconveniente opta-se pela descarga do concentrado no final da linha de tratamento.

Esta opção é viável para pequenas instalações, limitado pela capacidade hidráulica do sistema e pela capacidade de tratamento da estação que recebe a descarga (Xu *et al.*, 2013).

Descarga em Poços Profundos ou Aquíferos

A descarga em poços profundos consiste numa injeção do concentrado em aquíferos que não são utilizados para fornecer ou produzir água potável. A profundidade atingida nas injeções do concentrado varia entre 320 a 2600 m abaixo da superfície da terra (Tsiouris, 2001).

Esta técnica requer uma formação geológica adequada e um aquífero de água salina confinado, não sendo viável para áreas de atividade sísmica elevada ou perto de falhas geológicas. É essencial ainda, existir um licenciamento rigoroso devido a maior potencial de fugas e de contaminação de aquíferos, que se encontram nas proximidades e que servem para abastecimento de água (Xu *et al.*, 2013).

Lagoas de Evaporação

As lagoas de evaporação são estruturas construídas, onde se deposita a água do concentrado, permitindo assim que a água evapore e se forme um depósito de sais, no fundo destas estruturas (Mickley, 2001). Esta técnica é adequada para instalações costeiras e no interior, dependendo do clima, estando limitada a pequenos fluxos, sendo ainda, necessário o controlo de erosão, escoamento e gestão da vida selvagem (Xu *et al.*, 2013).

Técnica *Zero Liquid Discharge*

A técnica da *Zero Liquid Discharge* (ZLD) caracteriza-se por realizar um circuito fechado da água até ao limite máximo e eliminar a descarga de águas residuais.

Esta técnica permite converter o concentrado num sólido seco, com o auxílio de um mecanismo semelhante a um evaporador. A descarga do sólido resultante é, normalmente efetuada em aterros apropriados para o efeito (Mickley, 2001).

Uma das grandes vantagens associadas a esta técnica reside no facto de se reduzir significativamente qualquer tipo de impacte ambiental quando comparada com os outros tipos de descarga. Para além disso, o facto de a descarga final poder ser efetuada em aterros acaba por tornar este método como uma opção, quando outros não são passíveis de ser utilizados (Younos, 2005). No entanto, é na fase de descarga destes sólidos em aterro que se levantam ainda questões ambientais, como riscos de fuga de sais e contaminantes e consequente contaminação dos solos, aquíferos e lençol freático.

Lago Solar de gradiente salino

Este dispositivo é um reservatório de água coletor e armazenador de energia solar, composto por três zonas bem identificadas (figura 25). A zona superficial e a zona de armazenamento são essencialmente convectivas, já na zona intermédia a transferência de calor é feita por condução, funcionando como isolante entre o fundo e a superfície. Para que tal ocorra, é criado artificialmente, um gradiente de salinidade que impede a formação de correntes de convecção. Na zona intermédia desenvolve-se, de um modo natural e em consequência da absorção de radiação solar, um gradiente térmico. O facto de os coeficientes de difusão térmico e salino terem ordens de grandeza diferentes (o térmico é cerca de 100 vezes superior ao salino) dá origem a instabilidades nesta zona, denominada zona gradiente (Giestas, 2000).

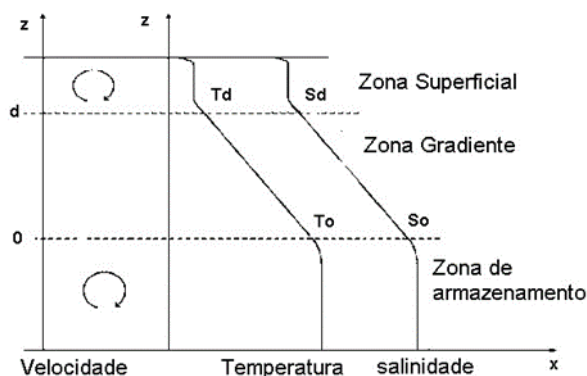


Figura 25 - Diagrama da zona gradiente (Giestas, 2000)

A combinação da tecnologia do lago solar de gradiente salino com múltiplos processos de dessalinização pode conduzir a um sistema de “descarga zero”.

Os lagos solares incidem em dois problemas ambientais críticos para a planta de dessalinização:

- ✓ Reutilizar o concentrado negando assim, a necessidade de descarga;
- ✓ Fornecer uma energia renovável para os processos de dessalinização.

É de referir que, desde 2010, existe um lago solar construído em Espanha, que possui uma superfície de 50 m² e um volume de 150 m³, onde a temperatura máxima conseguida é de 60 °C, podendo extrair-se cerca de 10 a 15 % de radiação solar incidente.

A figura 26 apresenta o diagrama de um lago solar de gradiente salino.

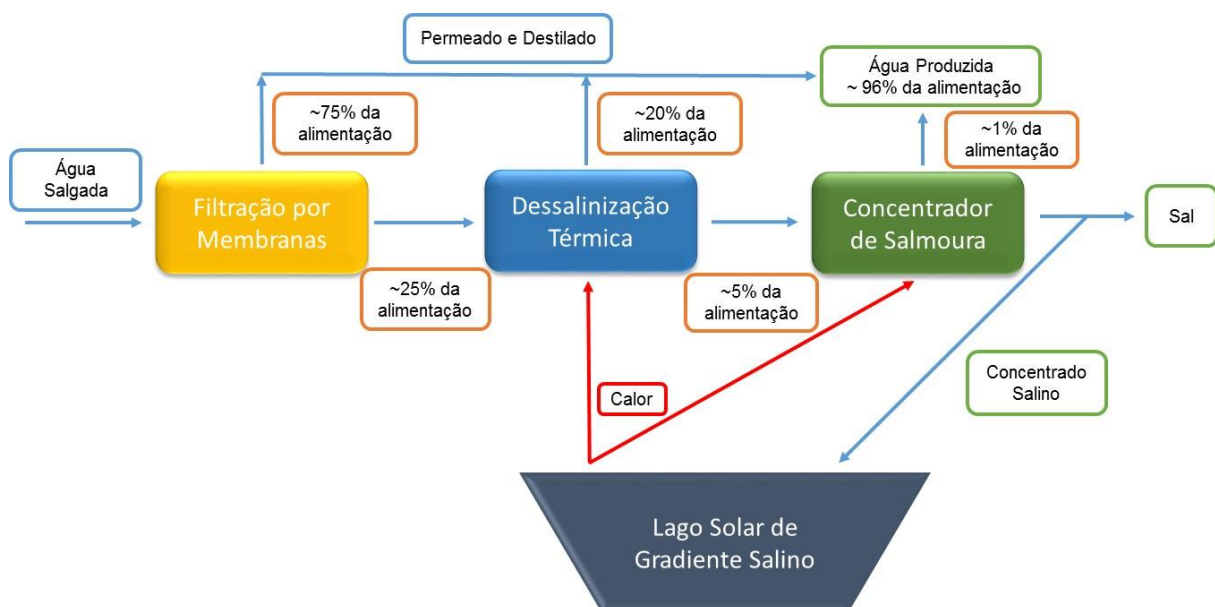


Figura 26 - Diagrama de um lago solar de gradiente salino (Lu, 2001)

2.2.6. Unidades de dessalinização

Atualmente, existem mais de 120 países que possuem unidades de dessalinização centralizada de larga escala, nomeadamente a Arábia Saudita, Estados Unidos da América, Emirados Árabes Unidos, Espanha e Austrália.

Arábia Saudita

A Arábia Saudita é o país com a maior produção de água dessalinizada, representando cerca de 17 % da produção mundial. As técnicas MSF e Osmose Inversa são os principais processos utilizados, sendo que técnica MSF representa cerca de 64 % da capacidade total instalada de dessalinização da Arábia Saudita.

Jubail é a maior unidade de dessalinização do mundo, produzindo cerca de 2 milhões de m³/dia de água dessalinizada (Mezher, *et al.*, 2011; El-Ghonemy, 2012).

As tabelas 5 e 6 apresentam as estações de dessalinização existentes na costa oeste e este, respetivamente, da Arábia Saudita.

Tabela 5 - Estações de dessalinização na Costa Oeste da Arábia Saudita (adaptado de El-Ghonemy, 2012)

Localização	Tipo de Processo	Capacidade de Produção (m ³ /dia)	Consumo Elétrico (MWh)	Nº Unidades
Costa Oeste				
Jeddah (Fase 2)	MSF	37 916	71	4
Jeddah (Fase 3)	MSF	75 987	200	4
Jeddah (Fase 4)	MSF	190 555	500	10
Jeddah (Fase 1)	OI	48 848	----	10
Jeddah (Fase 2)	OI	48 848	----	10
Yanbu (Fase 1)	MSF	94 625	250	5
Yanbu (Fase 2)	MSF	120 096	35	4
Yanbu (OI)	OI	105 904	----	15
Shoaiba (Fase 1)	MSF	191 780	157	10
Shoaiba (Fase 2)	FSF	390 909	340	10
Shuqaiq (Fase 1)	MSF	83 432	62	4
Hagl (Fase 2)	OI	3 784	----	2
Duba (Fase 3)	OI	3 784	----	2
Alwajh (Fase 2)	MSF	473	----	1
Alwajh (*T. Fase 1)	MED	825	----	2
Alwajh (T. Fase 2)	MED	1 032	----	4

Localização	Tipo de Processo	Capacidade de Produção (m³/dia)	Consumo Elétrico (MWh)	Nº Unidades
Alwajh (T. Fase 3)	MSF	473	----	1
Alwajh (Fase 3)	MED	9 000	----	----
Umm Iujj (Fase 2)	OI	3 784	----	1
Umm Iujj (Fase 3)	MED	9 000	----	----
Rabigh (Fase 1)	MSF	1 204	----	2
Rabigh (T. Fase 1)	MSF	774	----	1
Rabigh (T. Fase 1)	MED	18 000	----	----
Al Aziz (Fase 1)	MED	3 870	----	3
Al Birk (Fase 1)	OI	1 952	----	1
Farasan (T. Fase 1)	MSF	430	----	1
Farasan (T. Fase 1)	MED	1 075	----	5
Al-Qunfida (Fase 1)	MED	9 000	----	----
Total		1 458 360	1 615	112

Tabela 6 - Estações de dessalinização na Costa Este da Arábia Saudita (adaptado de El-Ghonemy, 2012)

Localização	Tipo de Processo	Capacidade de Produção (m³/dia)	Consumo Elétrico (MWh)	Nº Unidades
Costa Este				
Jubail (Fase 1)	MSF	118 447	238	6
Jubail (Fase 2)	MSF	815 185	762	40
Jubail	OI	78 182	----	15
Al-Khobar (Fase 2)	MSF	191 780	500	10
Al-Khobar (Fase 3)	MSF	240 800	311	8
Khafji (Fase 2)	MSF	19 682	----	2
Total		1 464 076	1 811	81

Estados Unidos da América

Os EUA são um dos países do mundo com maior capacidade de dessalinização de água. As principais fontes do processo de dessalinização são água salobra e água do rio, sendo que os níveis de salinidade são baixos, significando um baixo consumo de energia e de custo da água dessalinizada.

A maioria da atividade de dessalinização neste país está concentrada no Sul e a Oeste, sendo que na última década tem surgido a dessalinização nos estados a nordeste (Mezher *et al.*; Riha e Vedachalam, 2011, 2012).

O método mais utilizado nos EUA é a Osmose Inversa (Riha e Vedachalam, 2011, 2012).

A tabela 7 apresenta a comparação entre quatro estações de dessalinização nos EUA.

Tabela 7 - Comparação entre 4 estações de dessalinização nos EUA (adaptado de Riha e Vedachalam, 2012)

Parâmetros	Cape May	Brockton	Swansea	Rockland County
Capacidade de Produção (m³/dia)	7 570	18 927	8 320	28 390
Ano de Construção	1998	2008	2011	2015
Origem da Água	Aquífero de Atlantic City	Rio Taunton	Rio Palmer	Rio Hudson
SDT na água de origem (mg/L)	1,90	20 000	14 000 – 21 000	3,20
Custo Marginal de Produção de água (€/m³)	0,27	0,25	0,69	0,42
Custo da Água (€/m³)	1,475 – 1,678	1,017	1,017	----

Emirados Árabes Unidos

Os Emirados Árabes Unidos representam cerca de 14 % da capacidade global de água dessalinizada, sendo o terceiro país do mundo com maior capacidade de dessalinização de água. A tecnologia de MSF é o principal processo mais utilizado, sendo que cerca de 63 % da água dessalinizada total resulta desta tecnologia (Mezher *et al.*, 2011).

A tabela 8 apresenta as principais regiões que possuem unidades de dessalinização no EAU.

Tabela 8 - Principais regiões responsáveis pela dessalinização nos Emirados Árabes Unidos

Abu Dhabi			Dubai		
Estação	Tecnologia	Capacidade (m³/dia)	Estação	Tecnologia	Capacidade (m³/dia)
Shuweihat	MSF	378 541	Jebel Ali L1	MSF	317 800
Taweelah B extension	MSF	370 970	Jebel Ali G	MSF	27 252
Taweelah A1	Híbrida (MED + MSF)	317 975	Jebel Ali L2	MSF	250 000
Taweelah B	MSF	283 906	Jebel Ali	MSF	121 134
UAN west B	MSF	264 979	Jebel Ali M	MSF	477 330
UAN, Oeste	MSF	208 198	Jebel Ali K2	MSF	182 000
Taweelah	MSF	189 271	Jebel Ali K1	MSF	125 000

Apesar de existirem poucas unidades de dessalinização de água do mar ou salobra em Portugal, começam a surgir alguns exemplos como as unidades em Porto Santo e no Alvor.

Na ilha de Porto Santo existe escassez de recursos hídricos de água doce, sendo que o abastecimento de água potável para abastecimento público é feito exclusivamente, por dessalinização.

A água é produzida a partir da água salgada por osmose inversa, sendo utilizada maioritariamente para abastecimento público e, em algumas situações pontuais, para a rega do campo de golfe.

A central de dessalinização foi construída em 1980, estando situada junto ao cais de Porto Santo a uma cota de 2 m acima do nível do mar, sendo a única origem de água potável com qualidade, utilizada para o abastecimento público da totalidade da ilha, à exceção de duas unidades hoteleiras que têm produção própria de OI. A captação de água salgada é feita em 4 galerias subterrâneas sob uma camada rochosa impermeável.

Atualmente, o sistema tem uma potência de 1500 kW e é constituído por quatro unidades de osmose inversa, com uma produção diária de 6900 m³, através de uma captação de 15 700 m³/dia (ARM,2015)

A água produzida é encaminhada para um reservatório de água potável, com 100 m³ onde é efetuada a sua desinfeção, através da injeção de hipoclorito de sódio, para assegurar a qualidade microbiológica da água para consumo humano.

A taxa de recuperação do processo é de 40 %, sendo que 60 % da água rejeitada é devolvida ao mar, com o dobro da concentração inicial de sais (IGA, 2013).

A figura 27 exhibe a unidade de dessalinização de Porto Santo.



Figura 27 - Unidade de dessalinização de Porto Santo (IGA, 2013)

O grupo de Hotéis Pestana foi pioneiro em investir em sistemas de dessalinização após o período de seca de 2004, tendo inaugurado, em 2008, a unidade de dessalinização do Alvor.

O sistema de dessalinização por osmose inversa produz, atualmente, cerca de 700 m³/dia, com uma potência elétrica de 123 kW e é composto por cinco etapas:

- ✓ A captação que é feita junto à praia, ocorre a 18 m de profundidade através da bomba de baixa pressão (P= 3 bar), com um caudal de 2 000 m³/dia;

- ✓ A água de alimentação bombeada para o pré-tratamento é sujeita à passagem por três microfiltros de areia para remover os resíduos sólidos e suspensão;
- ✓ A unidade de osmose é composta por 9 tubos cada um com 6 membranas, onde a taxa de conversão varia entre 30 e 39 %, sendo que o restante diz respeito ao permeado (água potável). Parte da pressão do concentrado é reaproveitada para a bomba, através do sistema de recuperação de pressão;
- ✓ O permeado é encaminhado para o sistema de pós-tratamento, que inclui a passagem num leito mineralizante de modo a neutralizar o pH;
- ✓ A água produzida é armazenada num reservatório de 1 000 m³ na central de dessalinização sendo posteriormente, sujeita a um processo de desinfecção com hipoclorito de sódio (Jorge *et al.*, 2014).

A taxa de remoção de sais é 99,75 % e o custo de produção da água é aproximadamente 0,80 €. A água dessalinizada é utilizada para a rega, abastecimento de piscinas e limpeza (Jorge *et al.*, 2014).

Na tabela 9 encontram-se os valores de referência para a salinidade da água de alimentação, do concentrado e do permeado.

Tabela 9 - Valores referência para a unidade de Osmose Inversa do Alvor (adaptado de Jorge et al., 2014)

Amostras	Valores de referência	[SDT]
Água de alimentação	40 – 50 mS/cm	28 – 35 kg/ m ³
Concentrado	60 – 80 mS/cm	42 – 56 kg/ m ³
Permeado	500 µS/cm	0,350 kg/ m ³

A figura 28 apresenta a unidade de dessalinização do Alvor.



Figura 28 - Unidade de dessalinização do Alvor (Jorge et al., 2014)

2.3. Recurso energético

Consumo de energia no Mundo

O consumo de energia primária no ano de 2012 pelas várias regiões do mundo foi variável e dependente do nível de industrialização e da evolução do crescimento económico dos vários países de cada região (figura 29). Estão claramente destacadas três regiões onde o consumo correspondeu a 87 % da energia primária total, a Ásia e Pacífico (62 %), a Europa e Eurásia (4 %) e a América do Norte (21 %), que correspondem a regiões emergentes ou com maior nível de industrialização. No outro extremo encontram-se as restantes três regiões que consumiram cerca de 30 % do consumo global, a América Latina (8 %), o Médio Oriente (10 %) e África (12 %).

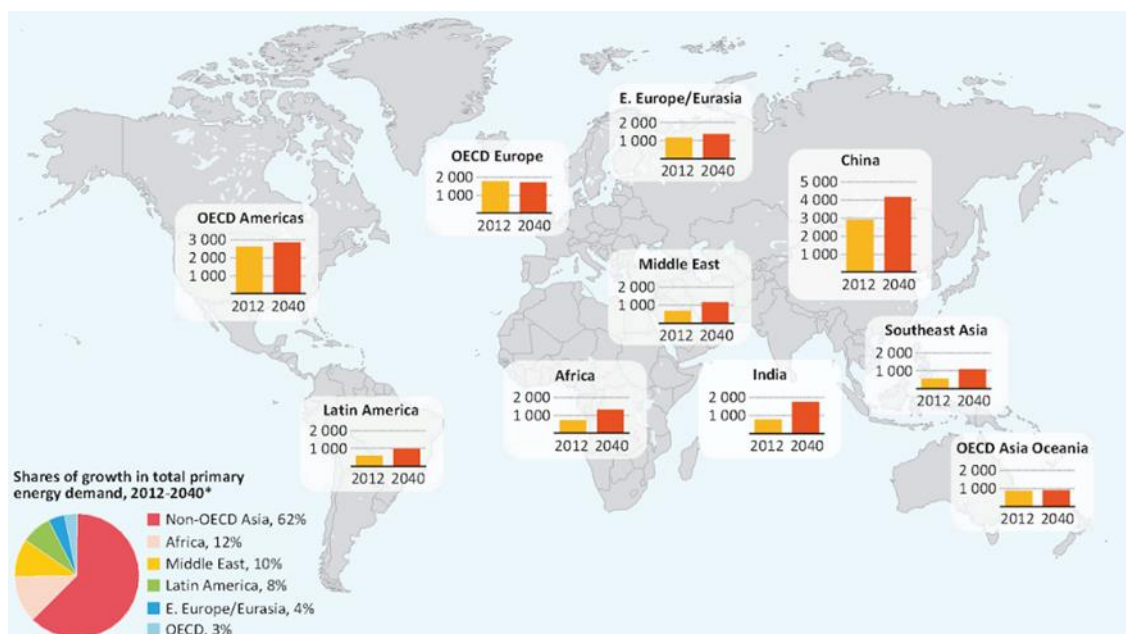


Figura 29 - Consumo de energia primária por região do Mundo (International Energy Agency, 2015)

Relativamente ao consumo mundial de energia, as energias de origem fóssil (Petróleo, Gás natural e Carvão) são as principais fontes de energia primária, sendo seguidas pelas energias Renováveis (figura 30).

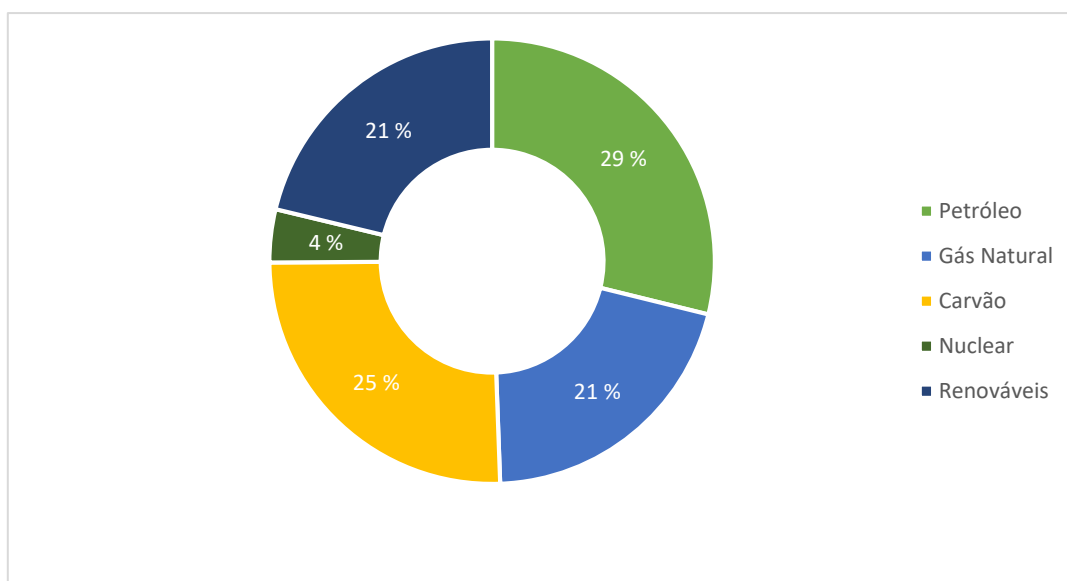


Figura 30 - Consumo mundial de energia (REN21,2015))

Ao analisar a figura acima, constata-se que as renováveis têm uma expressão significativa no consumo mundial de energia, sendo que o consumo incidu sobretudo sobre a Biomassa e energia Hídrica (figura 31).

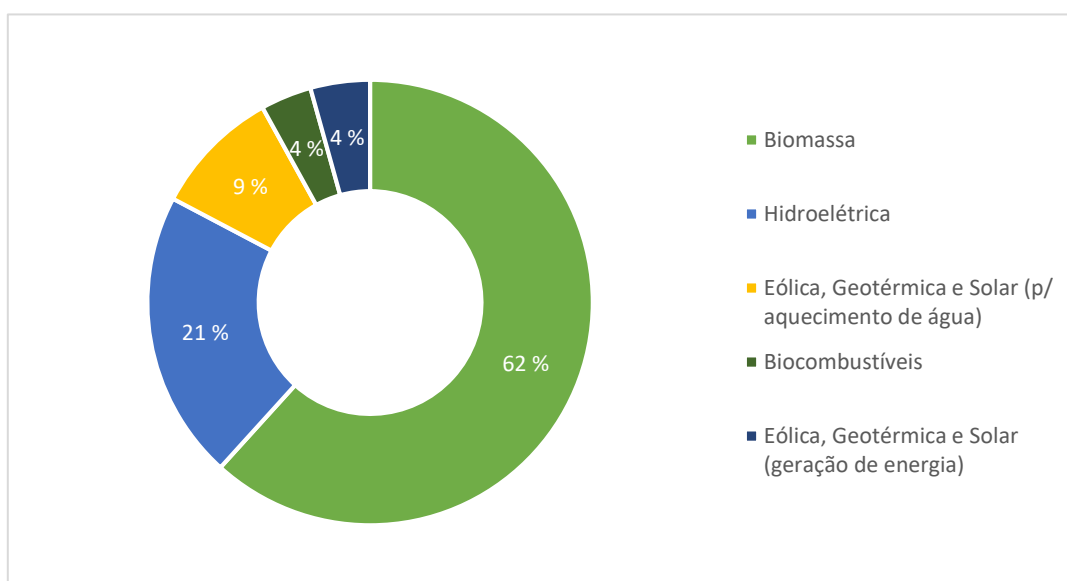


Figura 31 - Consumo mundial de energias renováveis (REN21, 2011)

Relativamente ao consumo por setor de atividade (figura 32), verifica-se que o setor da Indústria é a principal fonte de consumo, seguido pelo setor dos Transportes.

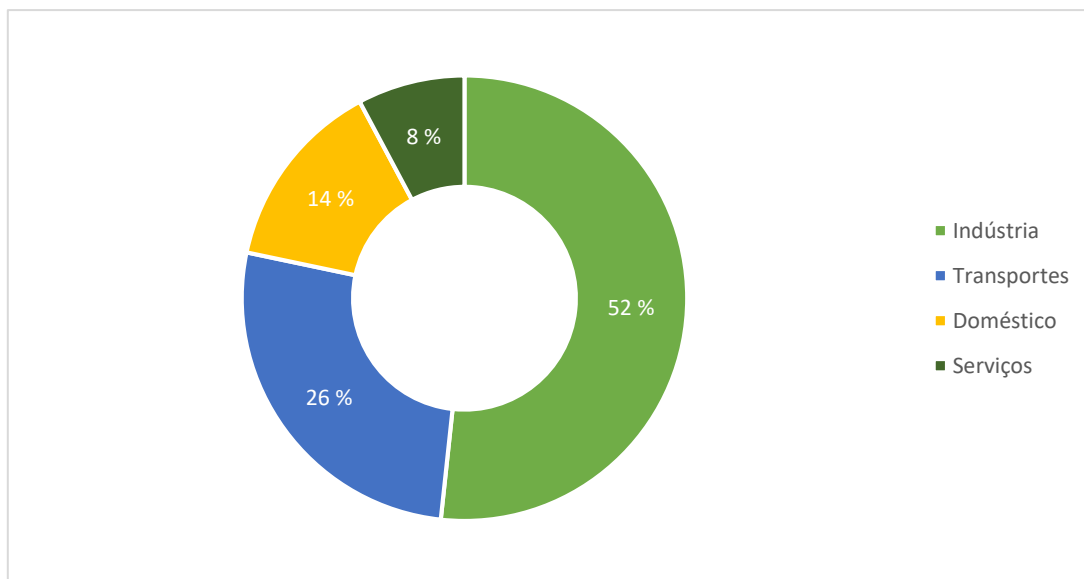


Figura 32 - Consumo mundial de energia por setor (EIA, 2012)

Consumo de energia na Europa

Quanto ao consumo de energia na Europa, as energias de origem fóssil (Petróleo, Gás natural e Carvão) são as principais fontes de energia primária, sendo seguidas pelas energias Renováveis (figura 33).

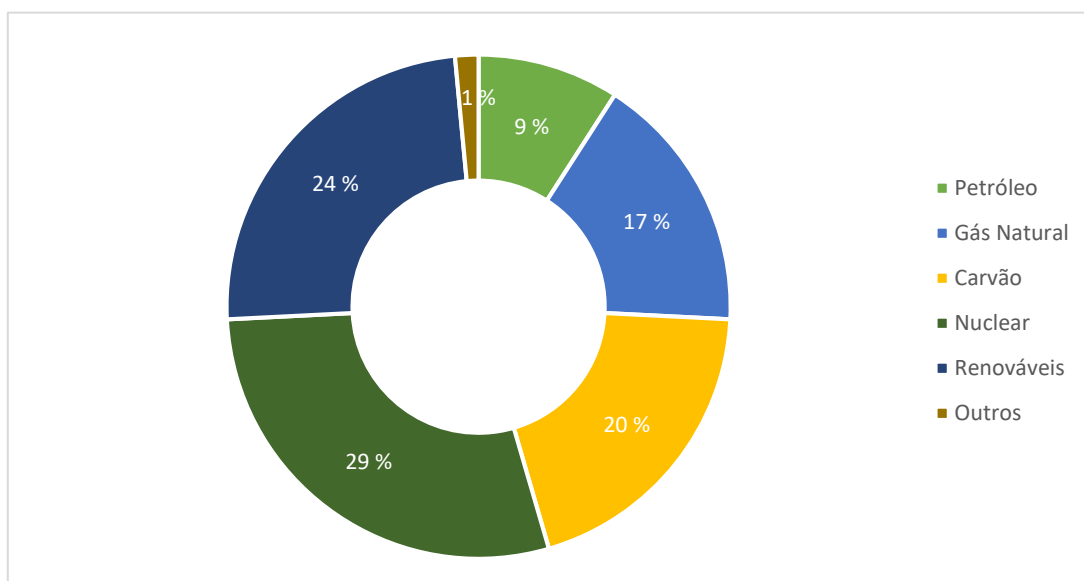


Figura 33 - Consumo de energia na Europa (Eurostat, 2013)

Ao analisar a figura acima, constata-se que as energias renováveis têm uma expressão significativa no consumo de energia na Europa, sendo que o consumo incidu sobretudo sobre a Biomassa e energia Hídrica (figura 34).

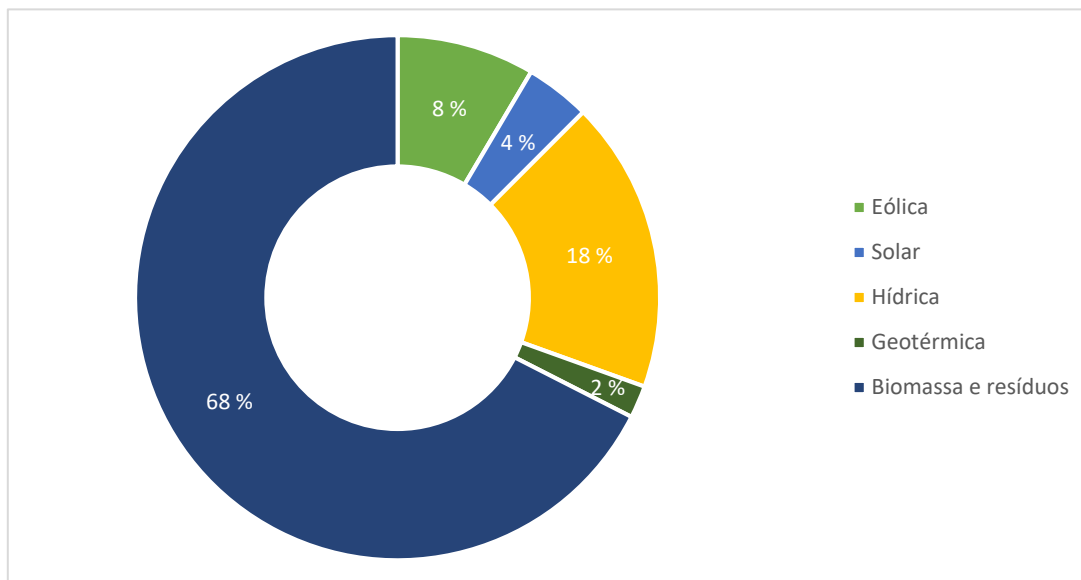


Figura 34 - Consumo de energias renováveis na Europa (Eurostat, 2013)

Em 2013, a análise da utilização final de energia mostra que existem três categorias dominantes, o setor dos Transportes, o Doméstico e da Indústria (figura 35).

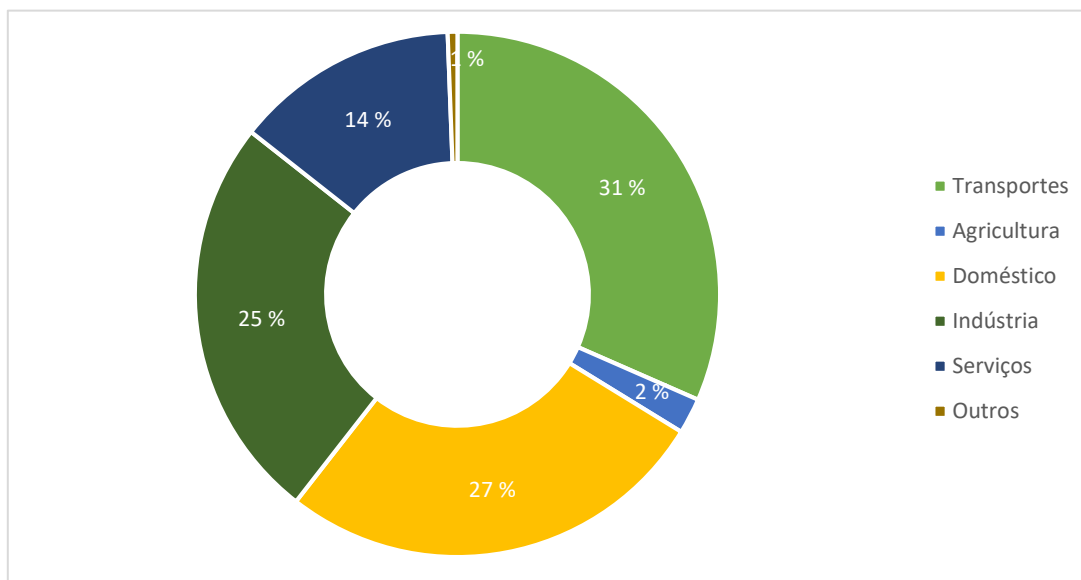


Figura 35 - Distribuição europeia do consumo de energia por setor (Eurostat, 2014)

Consumo de energia em Portugal

Analisando o consumo das diferentes fontes de energia em 2014, verifica-se que o Petróleo continua a ser a principal fonte de energia primária seguido das Renováveis e do Gás Natural (figura 36).

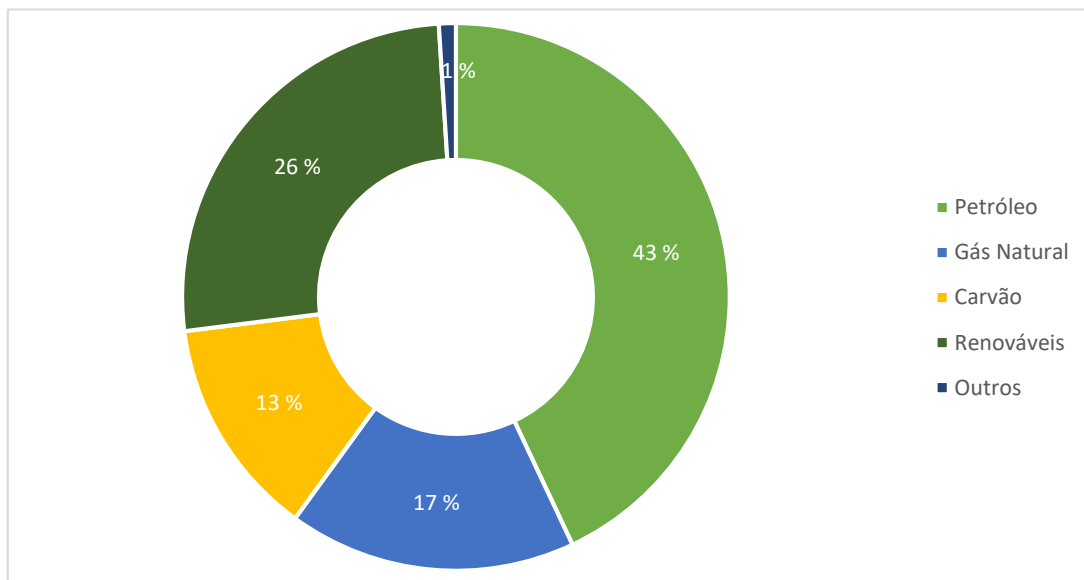


Figura 36 - Consumo de diferentes fontes de energia (DGEG, 2014)

Ao analisar o consumo de energias renováveis, verifica-se que a fonte de origem renovável que teve maior contribuição foi a hídrica, seguida da eólica, da biomassa e por fim, a solar (figura 37).

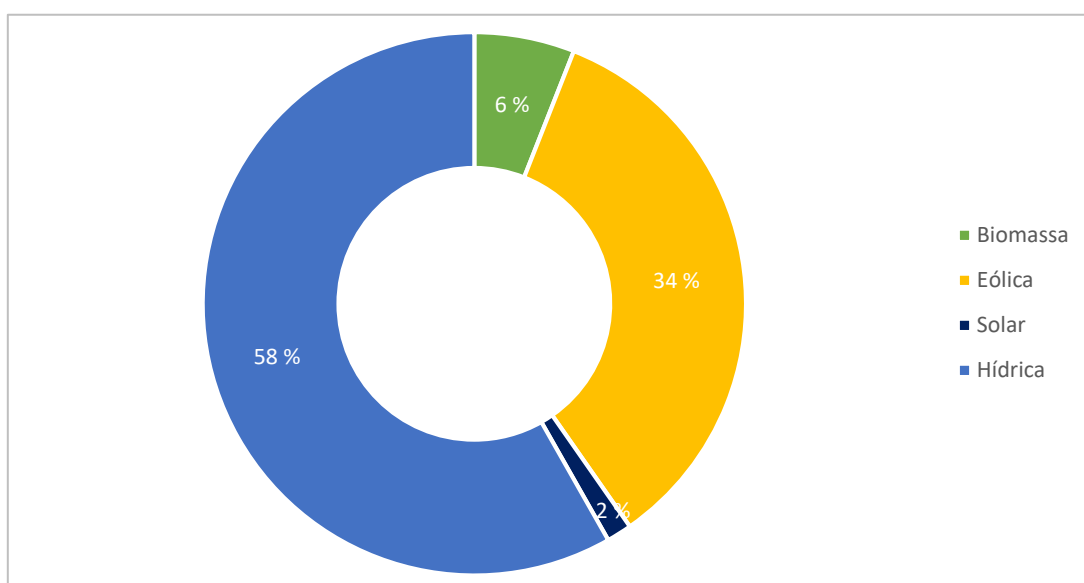


Figura 37 - Consumo de energias renováveis em Portugal (REN, 2016)

Como se observa na figura 38, relativamente à distribuição setorial do consumo, o setor dos Transportes é o principal consumidor de energia, seguido da Indústria, Doméstico, Serviços e Agricultura e Pescas.

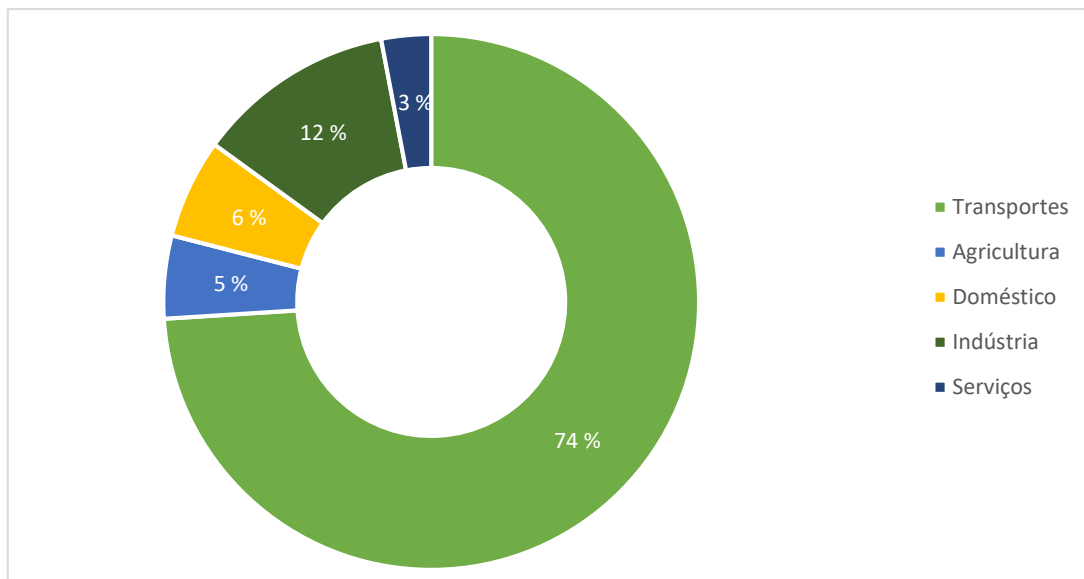


Figura 38 - Consumo de energia por setor de atividade (DGEG, 2014)

2.3.1. Energia solar

O Sol é a principal fonte de energia, sendo responsável pela existência e manutenção das inúmeras formas de vida presentes na Terra. Trata-se de um recurso praticamente inesgotável e constante, quando comparado com a escala de existência neste planeta, fornecendo anualmente, para a atmosfera terrestre, cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh.

A figura 39 apresenta o índice de radiação solar no planeta.

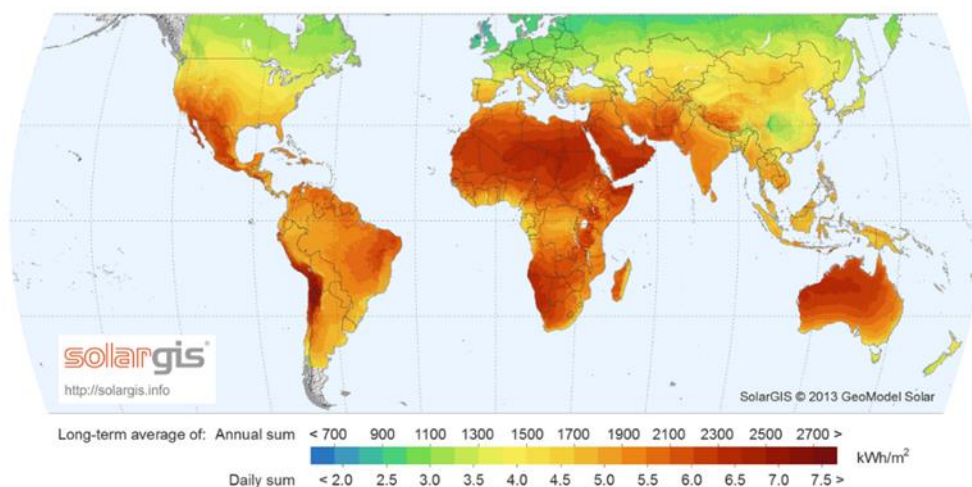


Figura 39 - Índice de radiação solar no planeta (GeoModel Solar, 2013)

Relativamente à Europa pode constatar-se que não existe um padrão relativamente à incidência de radiação solar, verificando-se que os países do Sul da Europa possuem uma maior média anual de radiação solar incidente quando comparados com os países do Norte, que possuem valores mais baixos (figura 40).

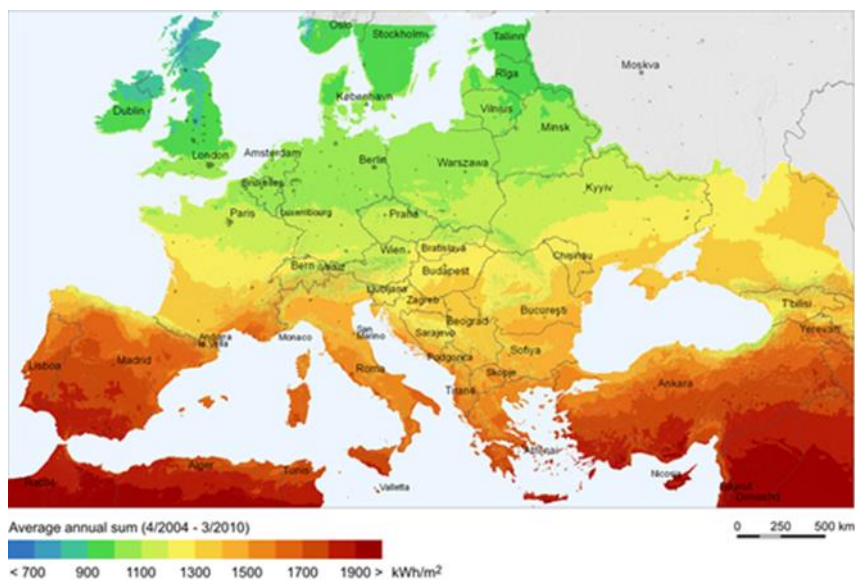


Figura 40 - Índice de radiação solar na Europa (SolarGis, 2011)

Quanto a Portugal Continental, este possui um índice global de radiação de cerca de 1650 kWh/m², tendo um potencial disponível bastante considerável (figura 41). Assim, Portugal é um dos países da Europa com melhores condições para aproveitamento deste recurso, permitindo reduzir a dependência dos combustíveis fósseis (Patrício, 2013).

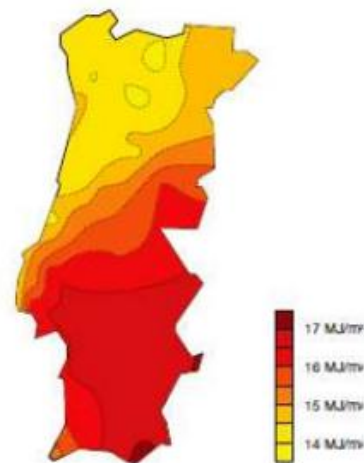


Figura 41 – Índice de radiação solar em Portugal Continental (IPMA, 2013)

Para um melhor aproveitamento da energia solar existem duas formas diferentes de a utilizar:

- ✓ Passiva – aproveitamento de energia para aquecimento de edifícios ou prédios, através de conceções de estratégias construtivas
- ✓ Ativa – transformação dos raios solares noutras formas de energia: térmica e elétrica

Em 2014 encontravam-se já instalados 1 133 965 m² de painéis solares térmicos em Portugal, na sua maioria no setor Doméstico, verificando-se um aumento de 13,9 % face a 2013, o que corresponde à instalação de 138 577 m² de novos painéis.

Como se pode verificar pela tabela 10, este potencial tem sido largamente aproveitado, registando-se um aumento de cerca de 40 % na capacidade instalada.

Tabela 10 - Capacidade instalada de energia solar em Portugal (DGEG, 2014)

Capacidade Instalada (MW)				
2012	2013	% 2013/2012	2014	% 2014/2013
242	299	+23,6	418	+39,8

Energia solar fotovoltaica

Uma das formas de converter a radiação solar é através da tecnologia fotovoltaica, que só é possível através de materiais semicondutores, como o silício.

A energia solar fotovoltaica possui inúmeras aplicações como:

- ✓ Eletificação remota - possibilidade de fornecer energia elétrica a lugares remotos;
- ✓ Sistemas autónomos - bombagem de água para irrigação, sinalização, alimentação de sistemas de telecomunicação;
- ✓ Aplicação de micropotência - relógios, máquinas de calcular;
- ✓ Integração em edifícios - integração de módulos fotovoltaicos na envolvente dos edifícios (paredes e telhados);
- ✓ Veículos - automóveis de recreio providos de células fotovoltaicas, com suficiente potência para movimentá-los, assim como também embarcações de recreio.

Energia solar térmica

Outra das formas de aproveitamento da energia solar, com aplicações e utilização diversas, é a tecnologia térmica. Esse aproveitamento deve-se ao coletor solar térmico, que capta a energia do sol, aquecendo a água.

A energia solar térmica possui diversas utilizações, tendo em conta a temperatura de uso (figura 42). Quando a temperatura é inferior a 100 °C, a energia solar térmica é aplicada eficazmente em processos como a fotocatalise, a secagem solar, produção de AQS (uso doméstico, hotéis) e de AQP (aquecimento de piscinas). Processos como a dessalinização, o uso de fornos solares e a climatização ocorrem tanto a baixa temperatura (≤ 100 °C) como a média temperatura (entre 100 e 250 °C). Para um tratamento eficaz de resíduos e de efluentes, a temperatura mais adequada é acima dos 250 °C.

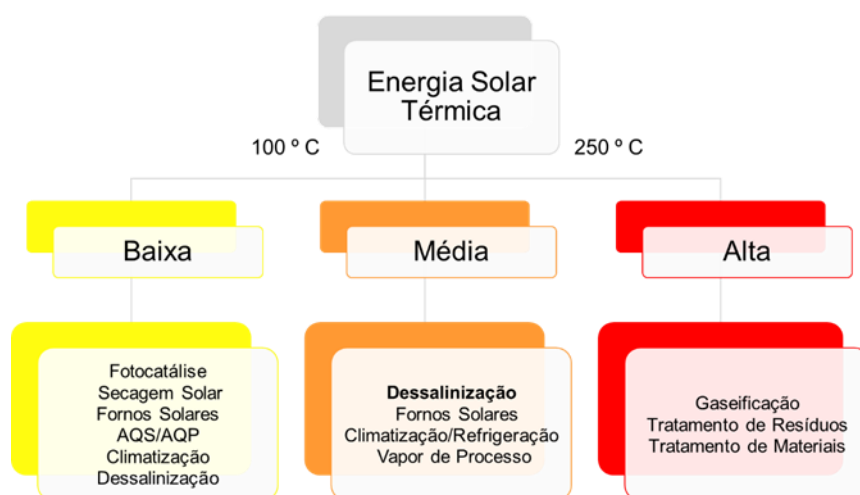


Figura 42 - Aplicações da energia solar térmica (Mendes, J.F., 2010)

O LNEG destaca-se em todas estas áreas de aplicação da energia solar térmica através de atividades e projetos desenvolvidos nas áreas científicas relacionadas com a baixa temperatura como os projetos SOL3 (trigeração solar) e SELF WATER (Dessalinização solar), assim como na gama de aplicações de médias temperaturas na produção de água quente sanitária, aquecimento e arrefecimento solar e calor de processo como são exemplo os projetos do Edifício SOLAR XXI (figura 43), o ESCASSEz (integração de bombas de calor) e SUSMILK (indústria dos laticínios), e ainda no projeto EU-SOLARIS (figura 44) que visa a implementação da produção de eletricidade por via termosolar (alta temperatura) em Centrais de Concentração em Portugal.



Figura 43 – Edifício Solar XXI (LNEG)



Figura 44 – EU – SOLARIS (LNEG)

2.4. Dessalinização por energias renováveis

A dessalinização de água salgada ou salobra necessita de quantidades significativas de energia elétrica ou de calor, dependendo do processo.

Devido à necessidade de se obter água devido à escassez existente no mundo, é necessária a construção de unidades de dessalinização em grande escala, tendo assim impactos ambientais relacionados com a emissão de gases de efeito de estufa resultante do uso de combustíveis fósseis.

De modo a reduzir a dependência dos combustíveis e a aumentar a eficiência energética no processo de dessalinização de água é importante associar-se este processo com energias renováveis.

Atualmente, as estatísticas existentes sobre a dessalinização mostram que apenas 1 % da água dessalinizada total é produzida a partir de energia proveniente de fontes renováveis (Water Desalination, 2012).

Os sistemas de dessalinização que usam fontes de energia renováveis podem ser divididos em três categorias: energia eólica, solar (fotovoltaica e térmica) e energia geotérmica. Estas fontes podem ser acopladas em sistemas térmicos e de membrana.

Na figura 45 constata-se que, das fontes de energia renováveis, a energia solar é a mais amplamente utilizada (70 %).

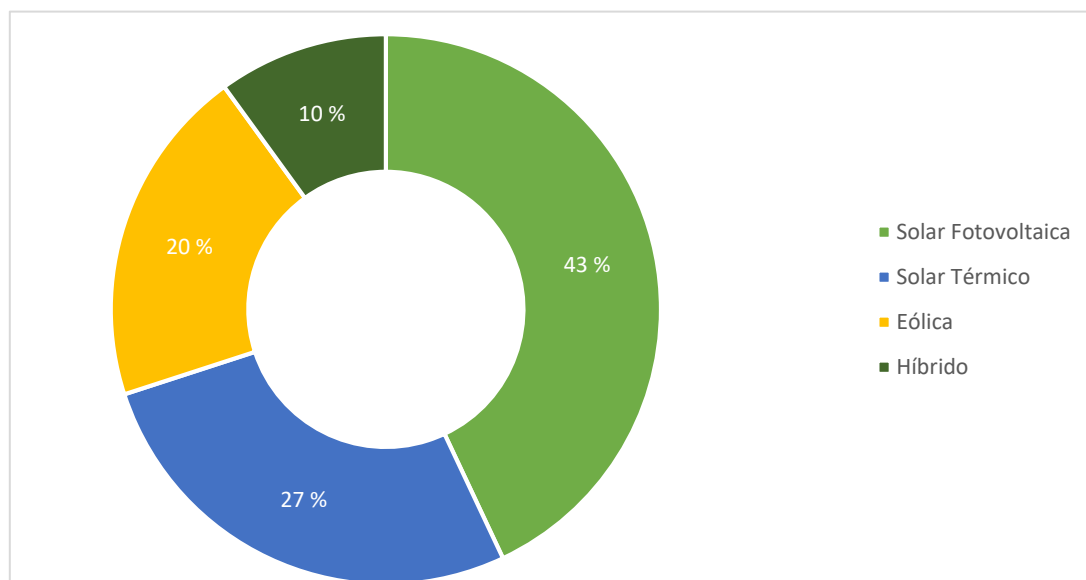


Figura 45 - Uso de energias renováveis na dessalinização de água (Quteishat & AbuArabi, 2012)

Os processos de dessalinização por energia solar dividem-se em 2 categorias, solar fotovoltaica e solar térmica. Por sua vez, esta energia solar térmica subdivide-se em duas subcategorias, a direta e a indireta. A figura 46 apresenta um esquema das diferentes configurações possíveis para a dessalinização com recurso a energia solar.

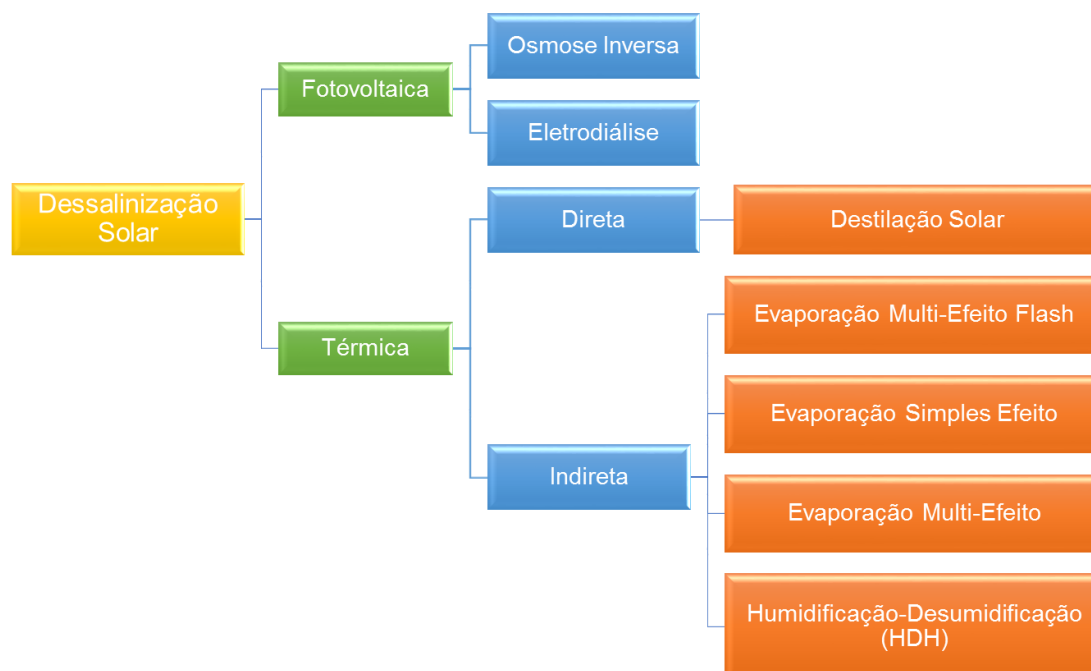


Figura 46 – Possível configuração de recursos energéticos solares com tecnologias de dessalinização de água (adaptado de Shatat, M., et al, 2013)

Segundo a tabela 11, ao combinar as tecnologias de dessalinização com a energia solar, é possível evitar a emissão de CO₂ para a atmosfera. Assim, é possível evitar, com os seguintes processos cerca de 76,56 kgCO₂ evitado/m³ água processada, onde no processo de Humidificação Multi-Efeito se evita cerca de 27,33 kgCO₂ evitado/m³ água processada, no processo Evaporação Multi-Efeito se evita cerca de 46,55 kgCO₂ evitado/m³ água processada e no processo de Osmose Inversa de baixa pressão evita-se cerca de 0,49 kgCO₂ evitado/m³ água processada e na de alta pressão evita-se cerca de 2,19 kgCO₂ evitado/m³ água processada.

Alguns dos resultados citados pelas fontes em que se baseia a tabela 11 podem ser objeto de alguma discussão, não caindo nos objetivos específicos da dissertação.

Tabela 11 - Associação das tecnologias de dessalinização com energia solar (PRODES)

Processos	Capacidade (m ³ /dia)	Energia necessária	Custo de geração de água
Humidificação Multi-Efeito Solar	1 – 100	Térmica: 100 kWh/m ³ Elétrica: 1,5 kWh/ m ³	2 – 5 €/m ³
Evaporação Multi-Efeito Solar	0,15 – 10	Térmica: 150 – 200 kWh/m ³	8 – 15 €/m ³
Osmose Inversa - Fotovoltaico	< 100	Elétrica: Baixa Pressão: 0,5 -1,5 kWh/m ³ Alta Pressão: 4 – 5 kWh/m ³	Baixa Pressão: 5 – 7 €/m ³ Alta Pressão: 9 – 12 €/m ³

Capítulo 3 - Atividade experimental

Conforme foi estabelecido nos objetivos específicos, procurou-se nesta fase ir ao encontro do estado de desenvolvimento de processos de dessalinização por energia solar, quer por via da conversão térmica quer por via da conversão fotovoltaica.

Assim, tendo como objetivo o conhecimento do funcionamento do tipo de sistemas acima referido, delineou-se uma atividade experimental recorrendo-se ao protótipo humidificação-desumidificação (conversão térmica) e ao piloto de osmose inversa (conversão fotovoltaica).

3.1. Protótipo Humidificação-desumidificação – Projeto SelfWater

O projeto SelfWater foi desenvolvido numa parceria entre o LNEG e a empresa Self Energy, e tem como objetivo produzir água doce, de forma descentralizada e energeticamente sustentável, estando vocacionado para satisfazer as necessidades de água de pequenas comunidades.

Este protótipo utiliza o processo térmico de Humidificação-Desumidificação com uma configuração do sistema solar indireta, composta por um circuito de aquecimento (tanque de inércia e permutador) e um circuito de consumo (dessalinizador). A configuração do ciclo de dessalinização é de ar fechado e água aberta aquecida, como pormenorizado anteriormente, procurando assim, um consumo reduzido e a possibilidade de autonomia energética através de um sistema solar térmico.

É composto por duas câmaras cilíndricas concêntricas que operam à pressão atmosférica (figura 47). O evaporador encontra-se no interior e o condensador no exterior. As câmaras são construídas em materiais termoplásticos de polietileno e polipropileno que resistem à combinação da água quente em ambientes salinos e corrosivos.

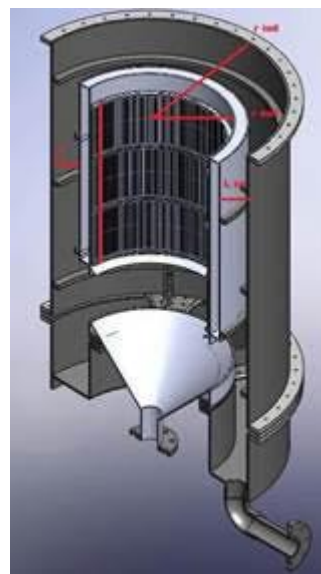


Figura 47 – Interior da câmara dessalinizadora do protótipo HDH e respetivo esquema (LNEG)

A água de alimentação é pré-aquecida no condensador através do calor latente libertado pelo vapor quente quando entra em contacto com a água fria. Posteriormente, desloca-se para um permutador de calor, que está acoplado a um tanque de inércia que aquece a água até cerca de 72 °C. Seguidamente, a água quente entra por um gotejador no evaporador. O ar, que circula entre as duas câmaras, vai absorver uma fração da água quente que entra no evaporador e a restante fica retida no enchimento ou é rejeitada (concentrado).

O ar quente húmido condensa na superfície dos tubos do condensador, onde circula água fria e origina o destilado. O concentrado e o destilado são colhidos por coletores dispostos na base do protótipo.

Componentes do protótipo SelfWater

Câmara de evaporação (Humificador)

O evaporador funciona como uma câmara de humidificação, onde o ar aquece e alcança o ponto de saturação. Esta câmara pode conter até quatro cestos com material de enchimento, tendo como função a retenção da água e a dispersão do caudal de entrada. O enchimento deve ser utilizado de forma a permitir o fluxo do ar, necessitando ter uma altura que não provoque uma perda de carga. Estes enchimentos devem ser construídos com materiais resistentes ao calor e a meios corrosivos, sendo que este protótipo tem um enchimento em tecido geotêxtil.

Câmara de condensação (Desumificador)

A câmara de condensação funciona como um permutador de calor em contracorrente, sendo constituída por quatro tubos com 100 metros cada, perfazendo um total de 400 metros, onde circula a água de alimentação.

Verificou-se em testes realizados anteriormente que, o vapor condensa nos três primeiros troços e que, para uma configuração com 200 metros de tubo, a água de alimentação estaria pouco tempo retida no condensador.

O condensador contém na sua parede exterior, uma placa de poliuretano que evita as perdas térmicas para o exterior.

Grupo de controlo hidráulico (Skid)

O SelfWater é composto por um circuito de água salgada fria (circulação da água entre depósitos e dessalinizador), circuito de água salgada quente (onde ocorre a transferência de calor entre a água pré-aquecida e o sistema de AQS) e por um circuito de AQS (circulação de água doce entre o permutador e a fonte de calor).

- ✓ Circuito de água salgada fria – a circulação da água salgada fria entre os depósitos e o dessalinizador ocorre através de uma eletrobomba. Este circuito é composto também, por um caudalímetro, um manómetro, um microfiltro (< 50 µS/cm) e um orifício para colocar um sensor de temperatura.

- ✓ Circuito de água salgada quente – neste circuito ocorre a transferência de calor entre a água salgada após pré-aquecimento, e a água do sistema de AQS através de um permutador de placas em titânio com 17 placas, funcionando em contracorrente.
- ✓ Circuito de AQS – composto por uma cadeia de electroválvulas e vasos de expansão que permitem misturar fluidos ou aumentar/reduzir o caudal e compensar as flutuações de volume e pressão no sistema de AQS.

Armazenamento de água térmica

O SelfWater possui um depósito de inércia de 1000 L com água estratificada com diferentes temperaturas, funcionando como uma instalação solar. O depósito armazena e abastece o circuito de AQS com água quente. É composto por três resistências elétricas com potências de 6 kW, 9 kW e 12 kW que aquecem a água consoante a necessidade de aquecimento e permitem manter a estratificação da temperatura da água no depósito (Jorge, 2014).

O protótipo HDH foi baseado na produção teórica média de 0,25 m³/dia de água doce, ou seja, processa 1 m³/dia (taxa de conversão 25 %), com o caudal médio horário de 0,1 m³/hora, no total aproximado de 10 horas de funcionamento contínuo. Para tal precisa de acumular energia térmica a 80 °C no depósito de inércia de 1 m³, usando um campo de coletores solares térmicos com cerca de 10 a 12 m² (6 coletores 2 m²).

A figura 48 mostra a unidade de ensaio de dessalinização solar térmica HDH.



Figura 48 – Unidade de ensaio de dessalinização solar térmica HDH (LNEG)

A figura 49 apresenta um esquema do funcionamento do protótipo.

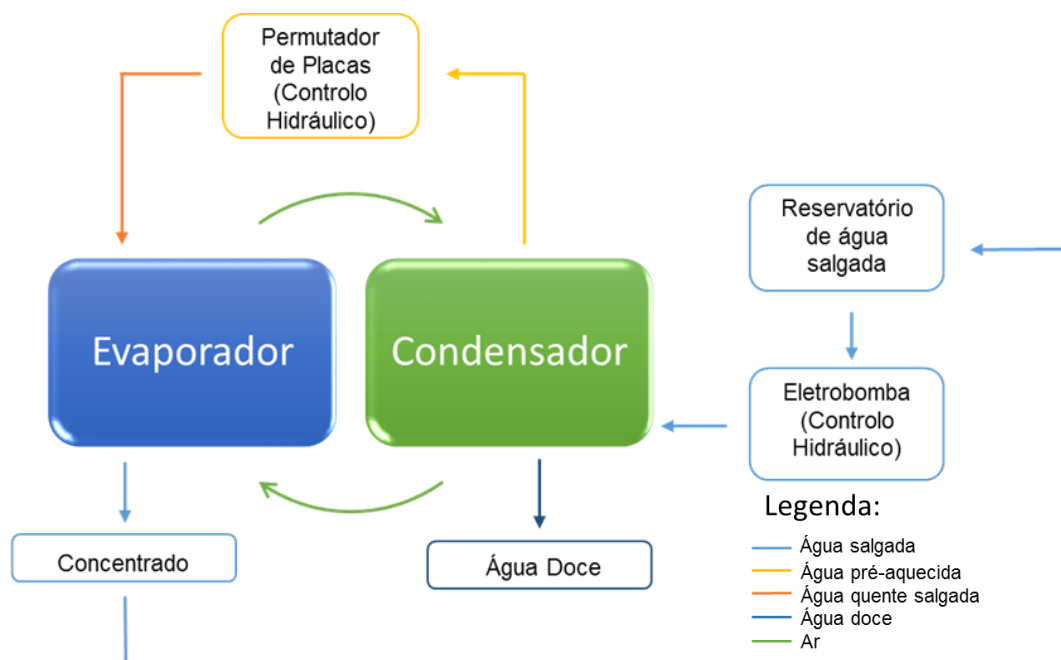


Figura 49 - Esquema de funcionamento do protótipo e respetiva legenda (adaptado de SelfWater, 2010)

3.1.1. Procedimento

Antes da realização do trabalho experimental foram realizados alguns trabalhos preparatórios como a calibração de sensores de temperatura, que serão explicitados no anexo III.

Os ensaios que deram origem aos resultados experimentais apresentados, tiveram como objetivo compreender a variação da produção de destilado, o comportamento térmico do condensador e do evaporador assim como, os parâmetros de desempenho para os três caudais diferentes.

Cada ensaio decorreu num intervalo de 3h a 4h, onde foram registadas as temperaturas dos sensores, o caudal de entrada e o do concentrado, o destilado acumulado e foram, ainda recolhidas amostras do destilado e do concentrado para a medição da sua condutividade elétrica. Os dados foram registados num intervalo de 30 minutos, exceto o registo das temperaturas que foi realizado num intervalo de 10 segundos.

A água salgada utilizada nos ensaios foi produzida artificialmente com água da rede e sal de cozinha. A condutividade da água produzida variou entre os 22 – 25 mS/cm, correspondendo a cerca de metade da condutividade da água do mar.

As temperaturas registadas durante os ensaios são referentes à temperatura de alimentação **T1** (entrada no condensador), do pré-aquecimento da água **T2** (saída do condensador), do chuveiro/gotejador **T3** (após o aquecimento), temperatura do ar no topo (**TC_topo**) e na base do condensador (**TC_base**), temperatura do ar no topo **T6** e na base do evaporador **T5** e a temperatura do concentrado rejeitado **T4** (figura 50).

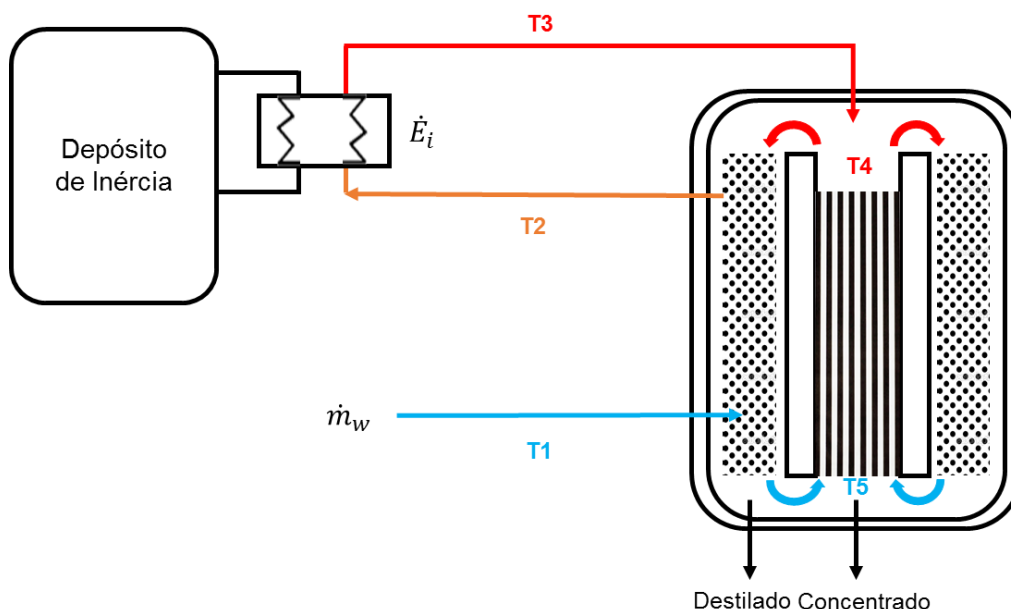


Figura 50 - Esquema do processo HDH

Os resultados correspondem à configuração do evaporador constituída por três cestos com uma área de enchimento total de 9 m² para três caudais diferentes ($Q = 70$ L/h, 84 L/h e 111 L/h) e um cesto vazio (figura 51). As condições de operação dos ensaios basearam-se na configuração do condensador (300 m de tubo) e a temperatura de entrada da água no chuveiro, sendo esta termostatzada pela plataforma de ensaios entre 72 °C e 73 °C.

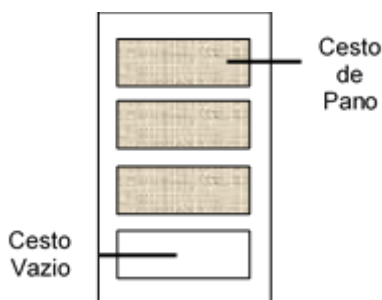


Figura 51 - Configuração do Evaporador

Os dados foram analisados detalhadamente, onde foi possível obter conclusões sobre o funcionamento do protótipo que serão referidas posteriormente.

3.2. Unidade Piloto Osmose Inversa

O piloto de Osmose Inversa é um sistema de carácter semelhante a qualquer outro sistema de osmose inversa, embora este piloto possua dois sistemas de alimentação, um exterior que é utilizado com o auxílio de uma bomba centrífuga e um outro que está incorporado ao sistema e que não necessita de uma bomba de baixa pressão ($P = 1$ bar) para aspirar a água.

Este sistema possui duas membranas, uma para a nanofiltração e outra para a osmose inversa. Possui ainda, três tanques de 80 L incorporados (um para a alimentação, um para o permeado e outro para o concentrado), três filtros (dois de corpos sólidos e um de carvão ativo), uma bomba de alta pressão ($P = 12$ bar) que é adequada para dessalinizar água salobra (abaixo de 7 mS/cm), um manómetro, um caudalímetro, tubos e válvulas. A potência utilizada neste piloto é 1500 W .

As membranas utilizadas neste piloto são do tipo aromáticas de poliamida, sendo estes elementos mais importantes na destilação por osmose inversa devido às suas características e seletividade. Estas membranas permitem uma rejeição de sais de cerca de 99% e uma recuperação do permeado de 10% .

Para o piloto RO, baseou-se no caudal de $0,25 \text{ m}^3/\text{hora}$ para as mesmas 10 horas de funcionamento, cujo consumo elétrico (neste modelo) será de 1 kWh . Para alimentação elétrica deste piloto por via fotovoltaica será necessário produzir instalar uma potência de pelo menos $2,5 \text{ kWp}$ ($12\text{-}14$ módulos de $200/220 \text{ Wp}$) para conversão DC/AC a partir de um banco de baterias para 12 horas de acumulação e um inversor (assegura a estabilidade da corrente ao motor ao longo do percurso variável da irradiação solar).

A figura 52 mostra a unidade piloto de Osmose Inversa e sua respetiva legenda.



Figura 52 - Piloto Osmose Inversa (LNEG)

3.2.1. Procedimento

Para as medições da quantidade de sal e condutividade da solução foi utilizado uma balança elétrica e um condutímetro calibrado à temperatura de 25 °C. Para a solução de 5 mS/cm foi utilizada como referência uma quantidade de 3 g de sal por litro de água, sendo ajustado este valor para as restantes concentrações (10 mS/cm e 15 mS/cm).

A pressão utilizada no sistema foi entre 10 bar (entrada da membrana) e 12 bar (saída da membrana) porque os tubos utilizados não suportam pressões superiores a 12 bar (tubos Rilsan).

Nos primeiros ensaios foram utilizados série de 5 em 5 mS/cm, não se aumentando mais a concentração das soluções visto que a membrana era de água salobra e não seria possível aumentar muito a pressão, não se atingindo pressões osmóticas das soluções mais concentradas, obtendo-se assim melhores taxas de caudal de permeado.

3.3. Resultados obtidos e discussão

3.3.1. Protótipo HDH

Os principais resultados dos ensaios obtidos a partir do protótipo HDH encontram-se nas tabelas 12 e 13 e correspondem à última amostra de cada ensaio. O caudal do ar foi estimado a partir da equação 1 (anexo IV) admitindo que a temperatura do destilado está próxima da temperatura do ar na base do condensador e a potência do aquecimento foi calculada a partir da equação 4 (anexo IV). Os gráficos que serão interpretados posteriormente representam o funcionamento do protótipo em estado estacionário.

Tabela 12 - Tabela resumo dos parâmetros medidos nos ensaios

Ensaio	Q entrada (L/h)	Q destilado (L/h)	\dot{m}_{ar} estimado (kg/s)	TXC (%)	\dot{E}_t (kW)	QM (kJ/kg)	GOR
1	70	3,8	0,071	5,4	2,28	2160	4,0
2	84	4	0,080	4,8	2,51	2259	4,0
3	111	5,1	0,099	4,6	3,59	2533	4,6

Tabela 13 - Valores da salinidade obtidos nos ensaios

Ensaio	Condutividade Elétrica (mS/cm)	Taxa de Remoção de Sais (%)
1	23,8	99,2
2	24,7	99,6
3	23,9	99,4

Experimentalmente, constatou-se que com a configuração do evaporador utilizada e os caudais de entrada com valores superiores, ocorreu uma maior produção de destilado. É notório que, a partir da equação 5 (anexo IV) do balanço de massa, ao aumentar-se o caudal de entrada, obtém-se maior quantidade de destilado e concentrado.

Ao longo dos ensaios constatou-se que as temperaturas de entrada variaram entre os 14 °C e os 18 °C, esta oscilação deve-se à reutilização do concentrado quente que resultou dos ensaios.

A temperatura de entrada no chuveiro (temperatura do chuveiro) variou entre 71 °C e 74 °C devido ao depósito de inércia que contém um sistema de termóstato e quando se atinge a temperatura pretendida, este desliga-se.

As temperaturas do ar na base do evaporador e na base do condensador são bastante idênticas entre si e à temperatura da água de alimentação, devendo-se, provavelmente aos sensores estarem localizados numa zona onde o condensador não funciona.

As restantes temperaturas variaram com os ensaios, podendo obter-se algumas conclusões acerca do funcionamento do evaporador e do condensador através das diferenças de temperatura de entrada e de saída.

É possível verificar as respetivas temperaturas nas figuras 53, 54 e 55.

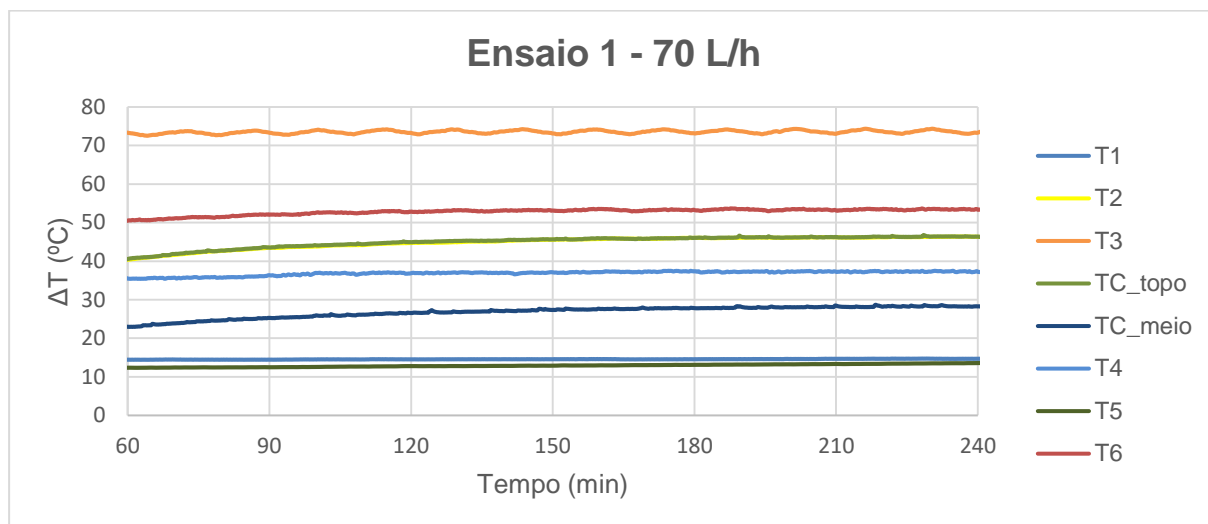


Figura 53 – Registo da variação das temperaturas para o caudal de 70 L/h

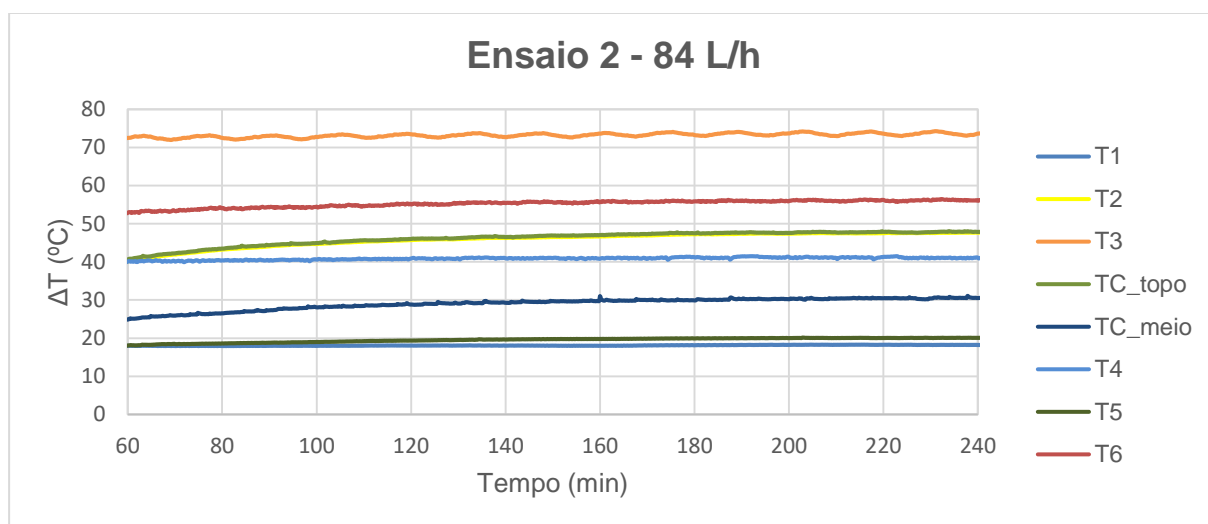


Figura 54 - Registo da variação das temperaturas para o caudal de 84 L/h

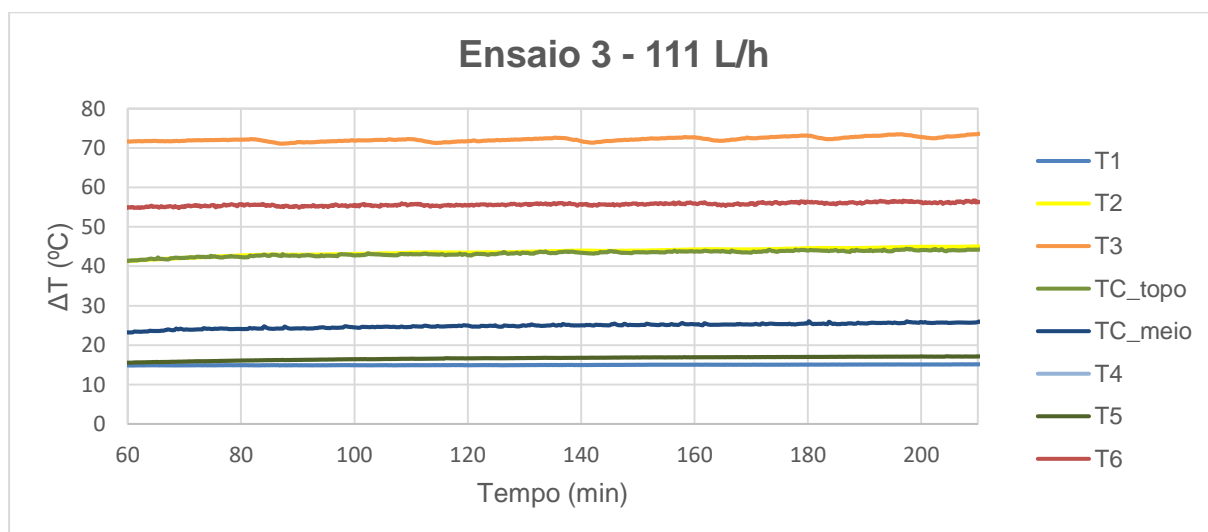


Figura 55 - Registo da variação das temperaturas para o caudal de 111 L/h

A monitorização da temperatura do concentrado é essencial para compreender o funcionamento do evaporador. Quando se verifica que a sua temperatura é muito elevada, conclui-se que o ar que circula na câmara de evaporação e o material de enchimento não têm capacidade de absorção e de retenção da água.

A quantidade de destilado produzido é maior para caudais maiores, embora a energia necessária para elevar a temperatura da água seja muito maior, tornando o sistema menos eficiente.

Um dos diferenciais estudados é o diferencial de temperatura da água no condensador.

O pré-aquecimento da água no condensador depende da energia recuperada no evaporador, da energia consumida na condensação assim como, da temperatura da água e do caudal de entrada.

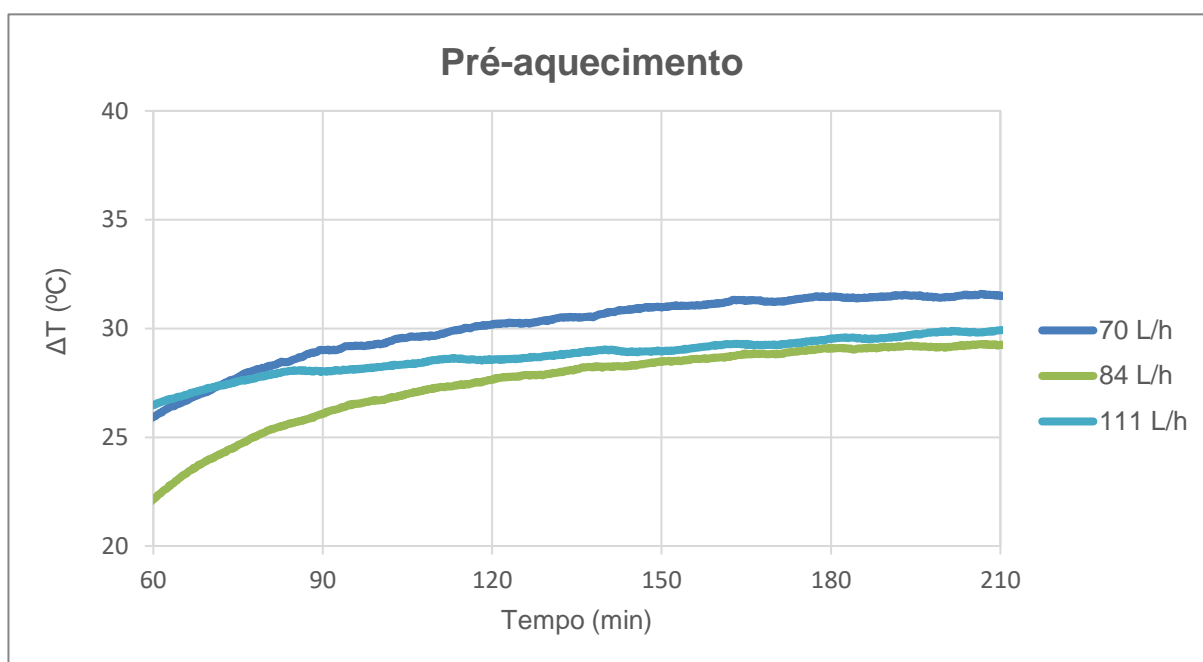


Figura 56 - Diferença de temperatura da água no Condensador

Na figura 56 verifica-se que, nos três ensaios realizados a temperatura de pré-aquecimento é mais elevada para caudais mais pequenos e vice-versa, exceto no caudal de 84 L/h, onde existe um menor ganho de temperatura devido à temperatura da água de entrada ser superior.

O aumento da temperatura do pré-aquecimento indica que o condensador está a recuperar eficientemente o calor latente da condensação, conseguindo transferir mais energia para a água de alimentação. Conclui-se que, quanto maior for a temperatura do pré-aquecimento, menor será o consumo de energia.

O outro diferencial estudado é o de temperatura da água no evaporador. A figura 57 apresenta o diferencial de temperatura entre a água de alimentação (71 °C – 74 °C) e a temperatura do concentrado. Os valores apresentados mostram que a diferença de temperatura da água no evaporador é superior para caudais mais pequenos, indicando que a temperatura do concentrado é menor para esses caudais. Assim sendo, pode concluir-se que o evaporador tem uma maior capacidade de retenção de água para caudais mais pequenos e que a maior parte da água quente serve para humidificar e aquecer o ar.

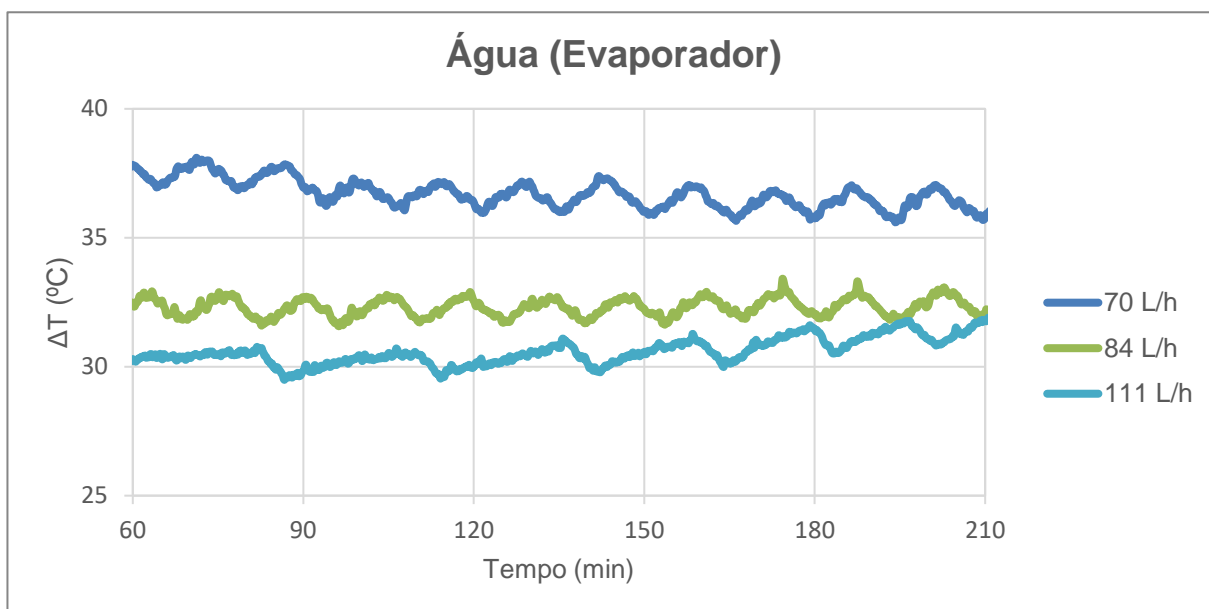
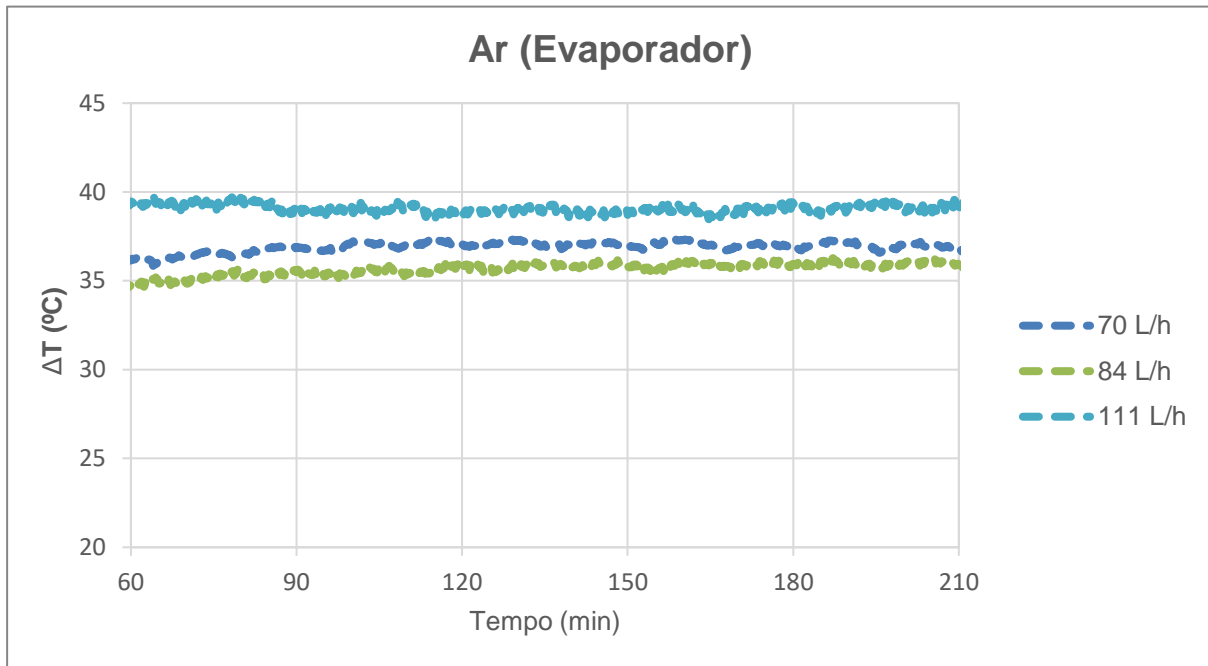


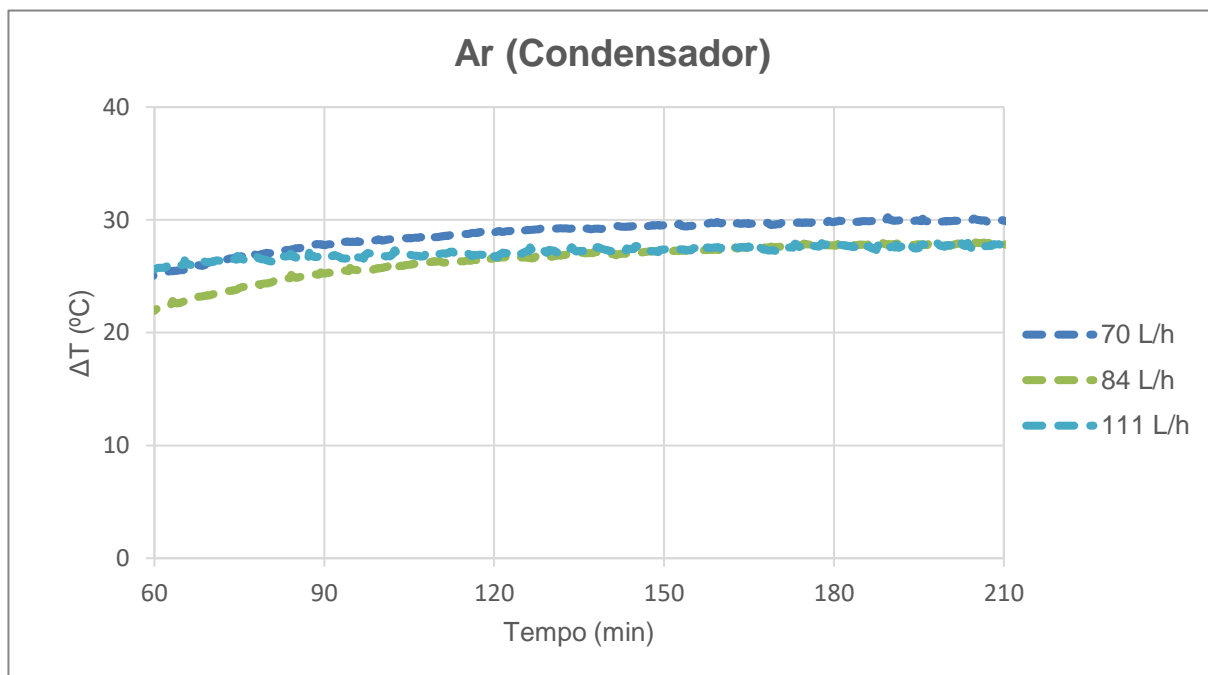
Figura 57 - Diferença de temperatura da água no Evaporador

Segue-se o diferencial de temperatura do ar no evaporador (figura 58). A energia ganha no evaporador corresponde à diferença entre a energia fornecida pela fonte de aquecimento e a energia desperdiçada pelo evaporador (eq.2 – anexo IV). Assim sendo, pode concluir-se que a diferença de temperatura entre o topo e a base do evaporador depende da temperatura do chuveiro e da temperatura do concentrado.

Como referido anteriormente, a temperatura do concentrado seria superior para caudais maiores e admitiu-se que a temperatura do chuveiro é constante, permitindo que se conclua, teoricamente que a diferença de temperatura do ar no evaporador é menor para caudais maiores.

*Figura 58 - Diferença de temperatura do ar no Evaporador*

Segue-se ainda, o diferencial de temperatura do ar no condensador (figura 59). O ar húmido quente do evaporador quando entra em contacto com os tubos do condensador, começa a fornecer calor para os tubos que contêm a água de alimentação e esse ar condensa. Por esse motivo, a temperatura do topo do condensador é inferior à temperatura do topo do evaporador. No condensador, tal como no evaporador, as diferenças de temperatura do ar no condensador deveriam ser menores para caudais mais elevados, exceto para o caudal 70 L/h, onde a diferença de temperatura é maior.

*Figura 59 - Diferença de temperatura do ar no Condensador*

Os parâmetros de desempenho que serão estudados são a taxa de conversão, a potência de aquecimento, consumo específico de energia, GOR e a taxa de remoção de sais.

A taxa de conversão mássica é a razão entre o caudal mássico de destilado obtido e o caudal mássico de água salgada de alimentação. Nos ensaios realizados obteve-se a maior taxa de conversão para o caudal de 70 L/h. Os valores das taxas de conversão mostram que o evaporador não tem área de permuta suficiente para caudais mais elevados, produzindo mais volume de água doce com um menor caudal de água salgada (figura 60).

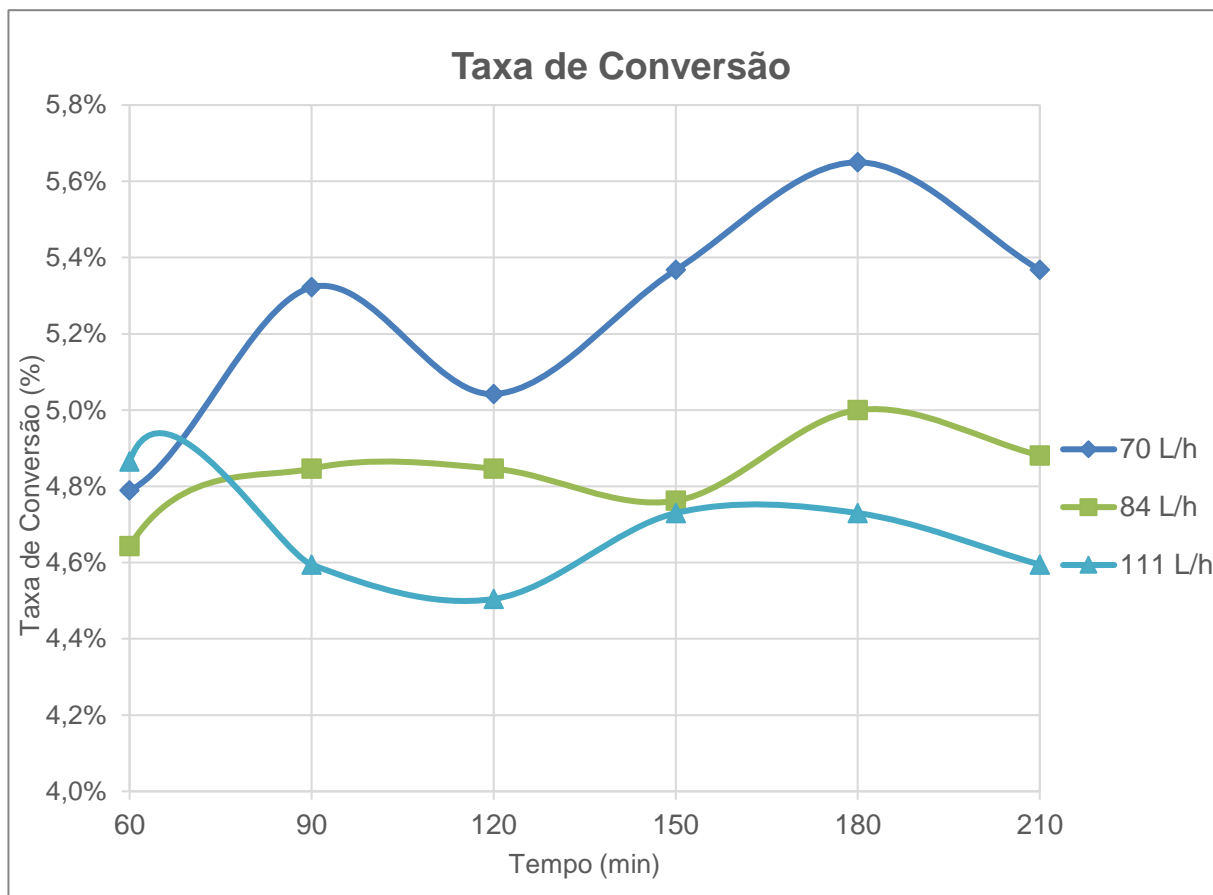


Figura 60 - Taxa de conversão para os diferentes caudais

O consumo específico de energia é a energia necessária imposta pelo sistema para produzir 1 kg de destilado (figura 61).

A energia cedida ao sistema tem de ser a suficiente para que a água mude de estado, produzindo assim, o destilado. Com os resultados obtidos nos três ensaios, verifica-se que o consumo específico varia entre 2089 – 2533 kJ/kg, sendo que o caudal 111 L/h possui o maior consumo específico.

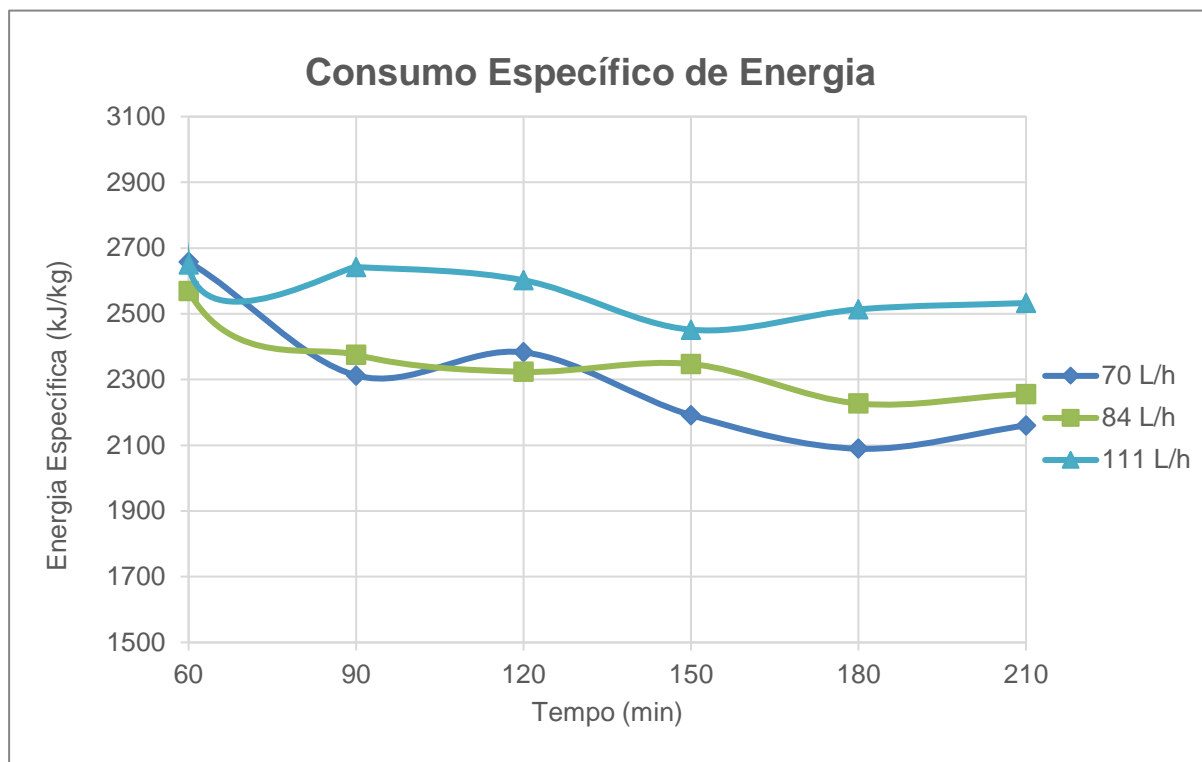


Figura 61 - Consumo específico de energia para os diferentes caudais

A potência de aquecimento necessária para aquecer a água depende do caudal de entrada, da temperatura após o pré-aquecimento e da temperatura de entrada no chuveiro (figura 62). Teoricamente, pode-se concluir que se aumentarmos o caudal de alimentação, necessita-se de uma maior potência para o aquecimento e ainda que, quanto maior for a recuperação de energia no condensador, menor será a potência de aquecimento. Assim, nota-se que para o caudal 111 L/h, a potência de aquecimento é maior que para os restantes caudais.

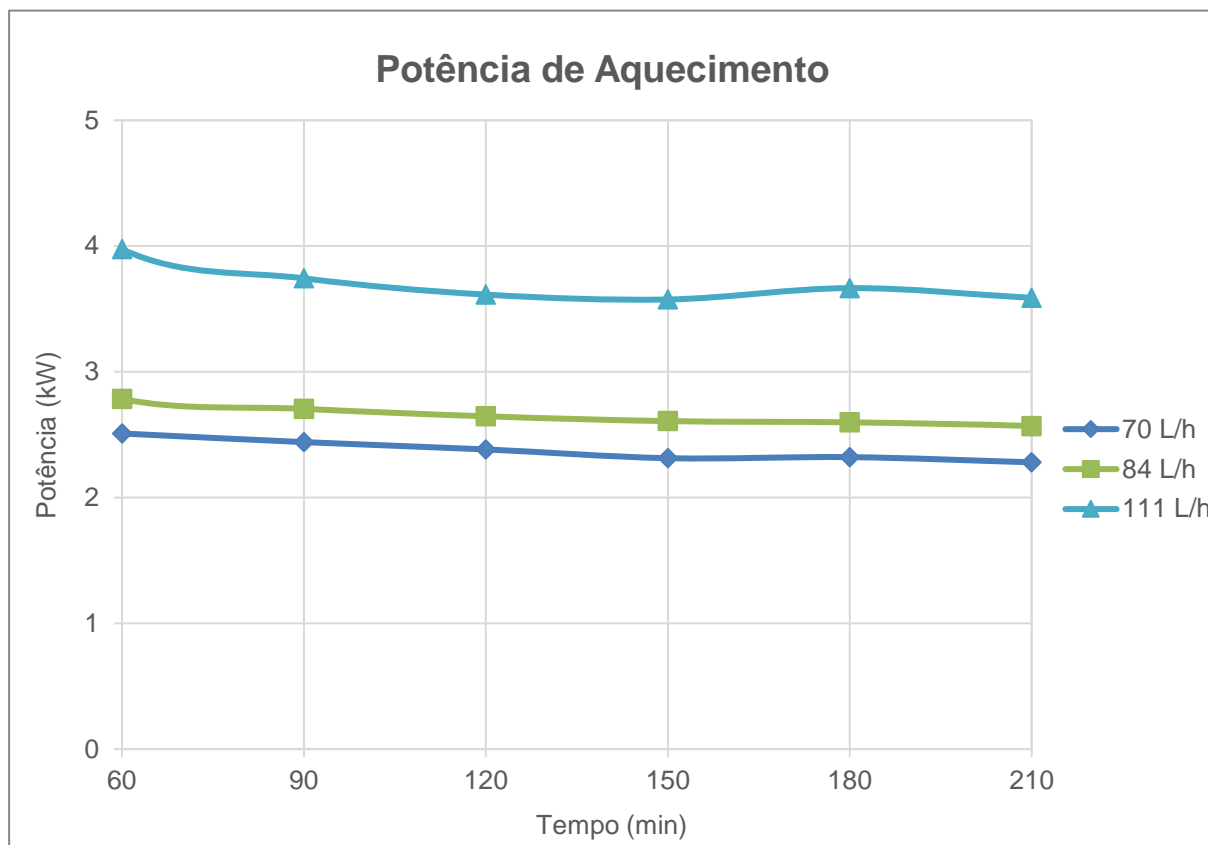


Figura 62 – Potência de aquecimento para os diferentes caudais

O GOR calcula-se com o caudal do ar estimado, a partir da equação 2 (anexo IV).

Verifica-se que a capacidade de remoção de sais do protótipo HDH é superior a 98 %, sendo que o caudal 84 L/h possui a melhor taxa de remoção de sais (figura 63). A condutividade da água de entrada de entrada nos três ensaios variou entre os 23 900 – 24 700 $\mu\text{S/cm}$ e a condutividade das amostras de destilado variou entre 109 – 196 $\mu\text{S/cm}$.

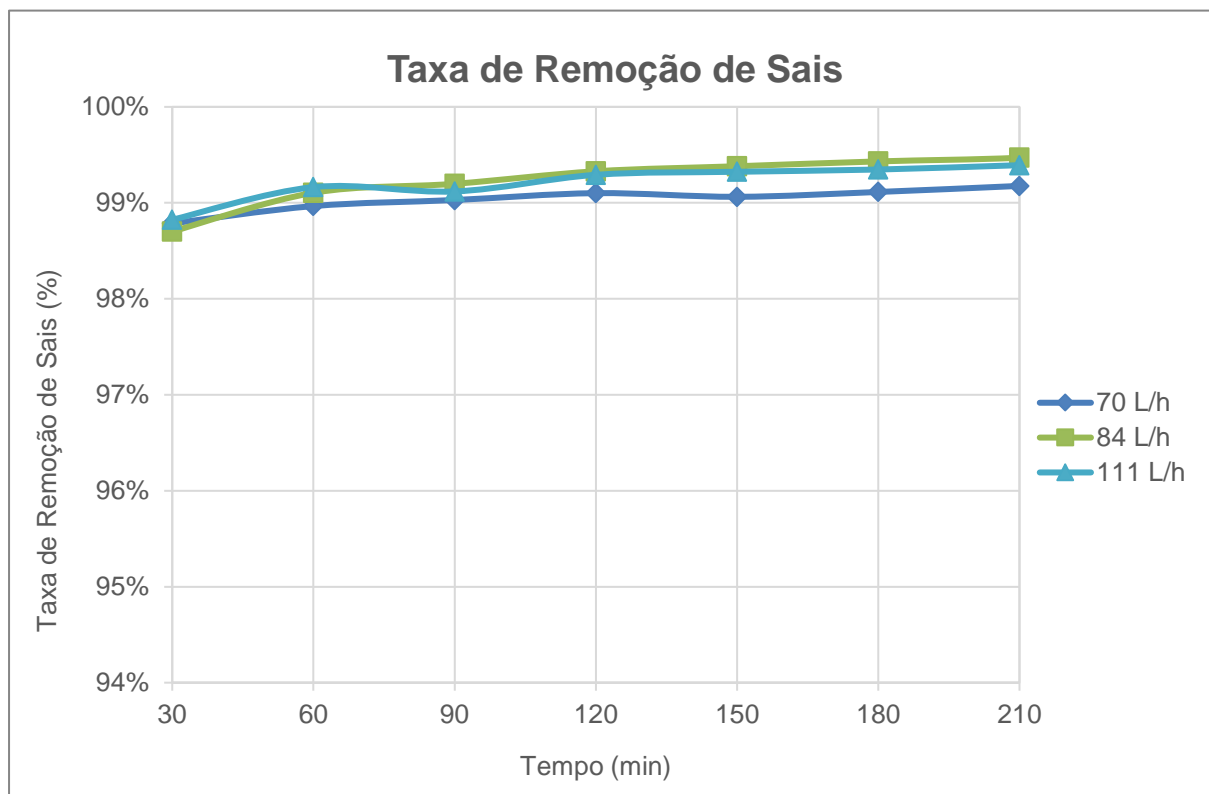


Figura 63 – Taxa de remoção de sais para os diferentes caudais

Após a análise dos resultados experimentais, realizou-se uma modelação no *Simulink* com caudais semelhantes aos testados experimentalmente, de modo a validar os dados experimentais. Os caudais modelados foram 72 L/h, 108 L/h e 144 L/h e as potências foram 3000 e 4000 W. As etapas do modelo e a sua explicação encontram-se no anexo V.

Estabeleceram-se parâmetros de ajuste das variáveis físicas para adequar o modelo à realidade do trabalho experimental, onde a temperatura de entrada seria 15 °C, que o coeficiente global de transferência de calor no condensador (U_c) seria 0,05 W/m².K⁻¹, que o coeficiente de transferência de massa no humificador (K_c) seria 0,01 kg/m².s⁻¹ e que o caudal mássico do ar (m_1) seria 0,01 kg/s.

Assumindo os pressupostos acima descritos, correu-se o modelo obtendo-se resultados que permitiram traçar os perfis de temperatura, sendo que a de pré-aquecimento variou entre 28 e 50 °C para os diferentes caudais e potências, a temperatura da água de alimentação (temperatura da água no chuveiro no trabalho experimental) variou entre 45 e 98 °C e que a temperatura do concentrado (temperatura do concentrado no trabalho experimental) variou entre 32 e 62 °C.

Verificou-se que a temperatura do ar seco variou entre 8 e 19 °C e que a temperatura do ar saturado variou entre 39 e 53 °C. É possível verificar as respectivas diferenças nas figuras 64 e 65.

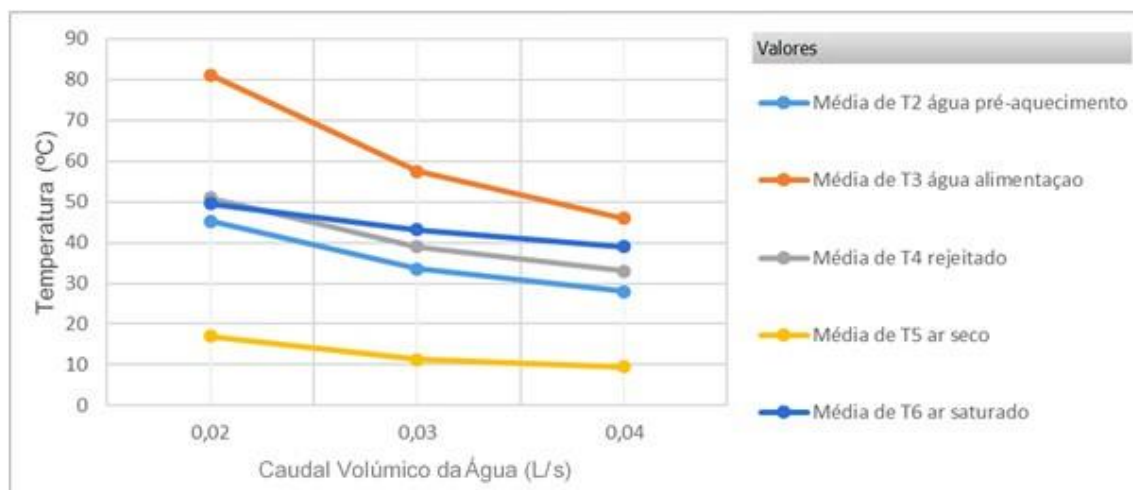


Figura 64 - Média de temperaturas em função do caudal mássico da água e potência 3000 W, com 9 m² de evaporador

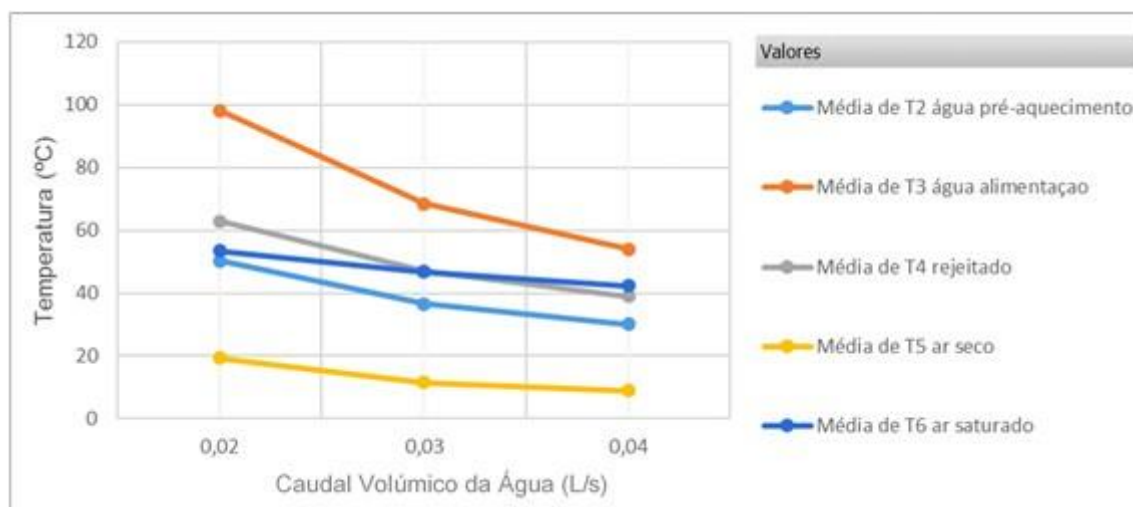


Figura 65 - Média de temperaturas em função do caudal mássico da água e potência 4000 W, com 9 m² de evaporador

Após a análise dos gráficos anteriores e dos que resultam do trabalho experimental concluiu-se que seria possível excluir o caudal de 70 L/h pois a potência utilizada não foi testada pelo modelo ($Q = 2000$ W). Quanto aos caudais de 84 L/h e 111 L/h fez-se uma aproximação das potências, de modo a serem comparadas com as potências testadas no modelo. Essas aproximações foram feitas tendo em conta a figura 60.

Assim sendo, para o caudal de 84 L/h, aproxima-se a potência para 3000 W e para o caudal de 111 L/h, aproxima-se para 4000 W.

Relativamente aos caudais modelados, estes vão aproximar-se dos caudais utilizados no trabalho experimental (figura 66).

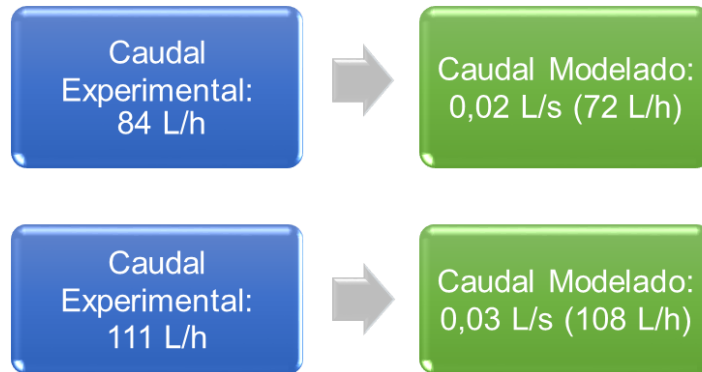


Figura 66 - Aproximações realizadas para a comparação do trabalho experimental com a modelação

Para além da exclusão do caudal de 70 L/h, excluiu-se também o caudal de 0,04 L/s pois é um caudal mais elevado que os caudais testados experimentalmente (144 L/h).

Analogamente, fixaram-se as potências elétricas de 3000 e 4000 W como forma de aproximação aos dados experimentais e ainda, porque estas potências se assemelham à instalação de campo de coletores de energia solar térmica.

Após as aproximações necessárias, compararam-se os diferenciais de temperaturas para ambos os caudais, de modo a comprovar se o processo segue um determinado desempenho térmico nos diversos subsistemas (evaporador, condensador e concentrado) no HDH.

Assim, para o subsistema condensador determinou-se o diferencial T2-T1 que determina o processo de transferência de massa de água, onde o calor latente é absorvido, permitindo a recuperação de energia. De seguida, para o subsistema evaporador obteve-se o diferencial T3-T4 que determina o processo de transferência de massa de água e de energia e por fim, o diferencial T6-T5 que resulta da interface entre o evaporador e o condensador.

Tomando como referência os resultados experimentais já apresentados e os dados que provem do modelo, é possível comparar os diferenciais de temperatura nos subsistemas do HDH (tabelas 14 e 15).

Tabela 14 - Diferenciais de temperatura para caudal 84 L/h e caudal mássico 0,02 L/s, com potência de 3000 W

Dados	T2-T1	T3-T4	T6-T5
Experimental	24,1 °C	30,5 °C	33,1 °C
Modelo	18,6 °C	19,8 °C	31,9 °C

Tabela 15 - Diferenciais de temperatura para caudal 111 L/h e caudal mássico 0,03 L/s, com potência de 4000 W

Dados	T2-T1	T3-T4	T6-T5
Experimental	25,5 °C	30,3 °C	38,2 °C
Modelo	15,1 °C	16,5 °C	33,4 °C

Para além dos diferenciais de temperatura determinados, outro parâmetro que é fundamental ter em consideração é a taxa de conversão do protótipo. A tabela 16 apresenta as respetivas taxas de conversão.

Tabela 16 - Taxas de conversão resultantes do trabalho experimental e da modelação

Dados	84 L/h (0,02 L/s)	111 L/h (0,03 L/s)
Experimental	4,8 %	4,6 %
Modelo	7,7 %	5,9 %

É relevante ainda, determinar a produção de destilado para cada caudal. A tabela 17 apresenta as respetivas produções do destilado do protótipo.

Tabela 17 - Produções de destilado resultantes do trabalho experimental e da modelação

Dados	84 L/h (0,02 L/s)	111 L/h (0,03 L/s)
Experimental	2,0 L/h	2,6 L/h
Modelo	5,6 L/h	6,4 L/h

Por fim, é essencial determinar o parâmetro GOR para cada caudal. A tabela 18 apresenta os respetivos GOR do protótipo.

Tabela 18 - GOR resultantes do trabalho experimental e da modelação

Dados	84 L/h (0,02 L/s)	111 L/h (0,03 L/s)
Experimental	4,0	4,6
Modelo	4,2	3,6

Após a análise das tabelas 14, 15, 16, 17 e 18 constata-se que existem discrepâncias quer nos diferenciais de temperatura resultantes do trabalho experimental e da modelação, quer nas taxas de conversão e na produção de destilado. No caso do subsistema evaporador (T3-T4), a tendência dos dados do modelo é afastarem-se, em função do aumento do caudal, dos resultados experimentais, o que indica que o evaporador está limitado da sua capacidade de absorver a água salgada, provavelmente por falta de área de evaporação.

Relativamente ao subsistema do condensador (T2-T1), a tendência dos dados do modelo é afastarem-se também, provavelmente devido ao desfasamento de energia utilizada em função do caudal.

No caso da taxa de conversão é nítido que os dados do modelo tendem a otimizar o processo de transferência entre o evaporador e o condensador, fornecendo melhores desempenhos e comprova-se que ocorre uma maior produção de destilado com estas condições.

Relativamente ao GOR, constata-se que este valor é baixo, embora este tenha aumentado quando comparado com o trabalho experimental para o caudal de 84 L/h, ocorrendo o oposto para o caudal de 111 L/h, considerando-se assim, que o modelo aproxima-se dos parâmetros iniciais impostos.

3.3.2. Piloto Osmose Inversa

Os principais resultados dos ensaios obtidos a partir do piloto Osmose Inversa encontram-se na tabela 18 e correspondem à última amostra de cada ensaio.

Os valores obtidos para a taxa de caudal do destilado são considerados baixos, visto que a taxa média do caudal do destilado é respetivamente 13,3 % e 9 %. Constata-se que, a taxa média de purificação da água é de 99,1 % e 98,9 %, respetivamente.

Tabela 19 - Resultados para as concentrações 5 mS/cm e 10 mS/cm

Concentração (mS/cm)	Q Aliment (L/h)	CE Permeado (µS/cm)	Q Permeado (L/h)	CE Concentrado (mS/cm)	Q Concentrado (L/h)	TX Destilado (%)	TX rej sais (%)
5	267,3	36,5	36	6,04	219,6	13,47	99,14
10	268,3	123,8	25,2	12,8	219,6	9,39	98,88

Capítulo 4 - Análise comparativa de sistemas de dessalinização

Tendo em conta os objetivos específicos, estabeleceram-se três cenários possíveis de dessalinização de água, sendo estes:

- ✓ Sistema de Humidificação-Desumidificação;
- ✓ Sistema de Osmose Inversa;
- ✓ Hibridação do sistema de HDH com reciclagem de concentrado, com o sistema de OI.

4.1. Sistema de Humidificação-Desumidificação

O sistema de humidificação-desumidificação é sistema alimentado por água do mar com um caudal de $10 \text{ m}^3/\text{dia}$, tendo uma concentração de sólidos dissolvidos totais de 35 kg/m^3 , resultando um concentrado com $43,4 \text{ kg/m}^3$ de sólidos dissolvidos totais, com um caudal de $8 \text{ m}^3/\text{dia}$. Por sua vez, o destilado resultante apresenta uma concentração de $1,4 \text{ kg/m}^3$ de sólidos dissolvidos totais, com um caudal de $2 \text{ m}^3/\text{dia}$ (figura 67).

Este sistema possui uma taxa de rejeição de 96 %, uma taxa de conversão de 20 % e ainda, um consumo energético de $101,5 \text{ kWh/m}^3$ água processada. Tendo em conta a tabela 11 (capítulo 2), é possível evitar-se cerca de $27,33 \text{ kg CO}_2 \text{ evitado/m}^3$ água processada.

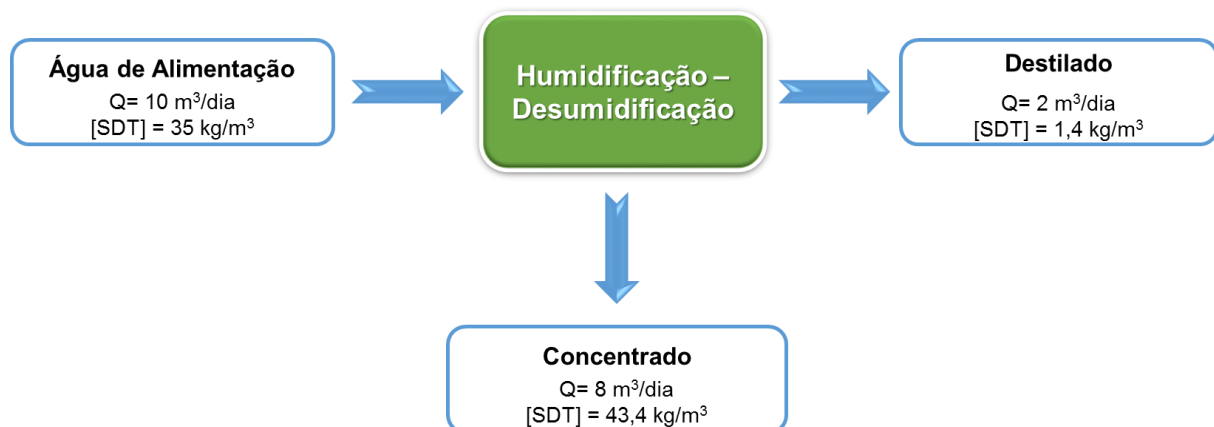


Figura 67 – Balanço de massa para o sistema de HDH

4.2. Sistema de Osmose Inversa

O outro cenário é o sistema de Osmose Inversa, alimentado por água do mar com um caudal de $10 \text{ m}^3/\text{dia}$, tendo uma concentração de sólidos dissolvidos totais de 35 kg/m^3 , resultando num concentrado com $49,7 \text{ kg/m}^3$ de sólidos dissolvidos totais, com um caudal de $7 \text{ m}^3/\text{dia}$. Por sua vez, o destilado resultante apresenta uma concentração de $0,7 \text{ kg/m}^3$ de sólidos dissolvidos totais, com um caudal de $3 \text{ m}^3/\text{dia}$ (figura 68).

Este sistema possui uma taxa de rejeição de 98 %, uma taxa de conversão de 30 % e um consumo energético de $4,5 \text{ kWh/m}^3$ água processada. Tendo em conta a tabela 11 (capítulo 2), é possível evitar-se cerca de $2,19 \text{ kg CO}_2 \text{ evitado/m}^3$ água processada.

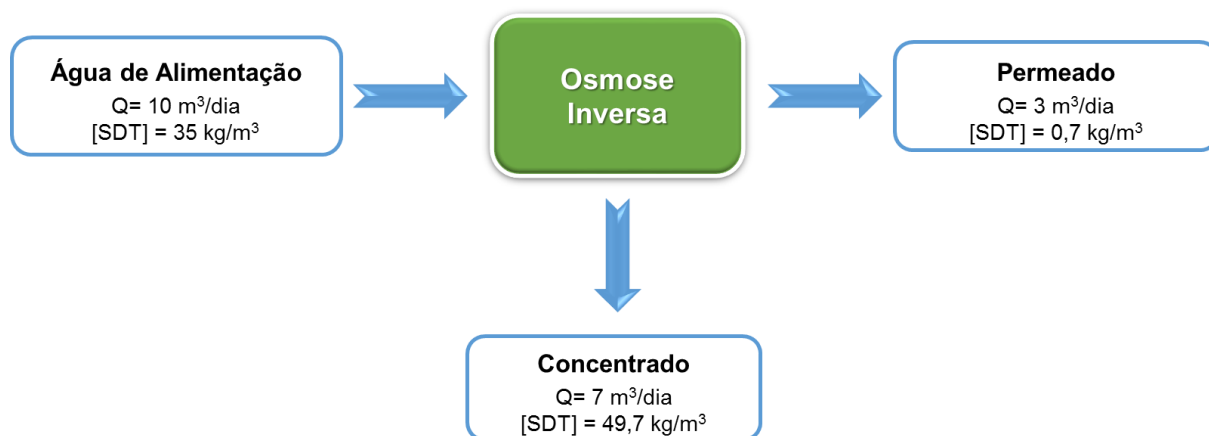


Figura 68 - Balanço de massa para o sistema de Osmose Inversa

4.3. Hibridação do sistema de HDH com reciclagem de concentrado, com o sistema de OI

Um outro cenário que importa avaliar é o de hibridação do sistema de HDH com reciclagem de concentrado, com o sistema de Osmose Inversa, com o propósito de reduzir a concentração salina do destilado que resulta do processo de HDH até um teor que permita a alimentação ao módulo de OI, reduzindo a pressão utilizada e consequentemente, o consumo energético.

A salinidade do concentrado gerado vai aumentar com o número de ciclos efetuados, sendo este o fator que irá limitar o seu número. Assumindo que, em cada ciclo há uma recuperação de destilado de 20 % e que há um efeito de concentração da salinidade de cerca de 24 %, prevê-se que o número de ciclos adequados para se atingir o objetivo de qualidade da água que alimenta o sistema de Osmose Inversa é de 15.

As condições operacionais iniciais destes ciclos são semelhantes para cada ciclo que for efetuado, isto é, não ocorre o efeito da temperatura, do caudal, da taxa de recuperação e dos consumos energéticos, sendo todos estes mantidos.

Esta hibridação seria efetuada em duas etapas: primeiramente, o sistema de HDH, com reciclagem de concentrado seria operado ao longo de 15 dias, processando um caudal médio diário de água do mar de 10 m^3 . O destilado produzido diariamente seria acumulado num depósito e, posteriormente, processado na unidade de OI com um caudal médio diário de 10 m^3 (processando-se os 30 m^3 num período de 3 dias). O concentrado remanescente do HDH e o da OI seriam armazenados e geridos posteriormente.

A etapa 1 consiste na alimentação de água com um caudal de $10 \text{ m}^3/\text{dia}$, possuindo uma concentração de sólidos dissolvidos totais de $80,45 \text{ kg/m}^3$, resultando um concentrado com um caudal de $8 \text{ m}^3/\text{dia}$ e uma concentração de sólidos totais de $99,76 \text{ kg/m}^3$ (figura 69). O destino possível deste concentrado seria a deposição num lago solar, de modo a atingir a *zero liquid discharge*. O destilado produzido possui um caudal de $2 \text{ m}^3/\text{dia}$ e uma concentração de sólidos dissolvidos totais de $3,22 \text{ kg/m}^3$, possuindo a qualidade necessária para alimentar o sistema de Osmose Inversa.

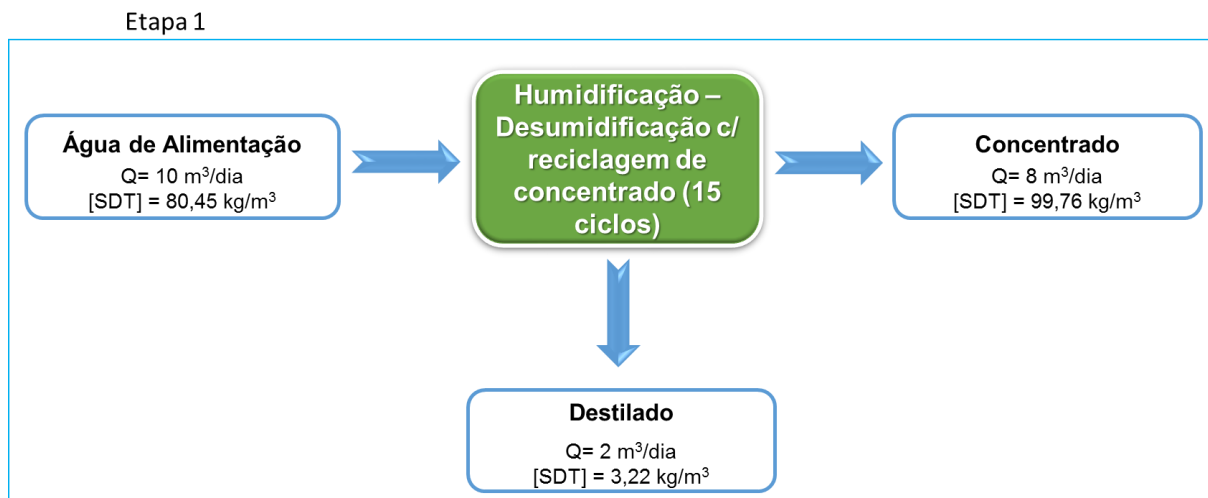


Figura 69 - Balanço de massa para o sistema de HDH com reciclagem de concentrado com 15 ciclos

Após a alimentação do sistema de Osmose Inversa (etapa 2), resulta um concentrado de $4,57 \text{ kg/m}^3$ de sólidos dissolvidos totais com um caudal de $7 \text{ m}^3/\text{dia}$ e um permeado com um caudal de $3 \text{ m}^3/\text{dia}$ com uma concentração de sólidos dissolvidos totais de $0,06 \text{ kg/m}^3$ (figura 70). O destino possível para o permeado seria reintroduzi-lo no sistema inicial.

O sistema de hibridação apresenta um consumo energético de $102,5 \text{ kWh/m}^3$ água processada. Tendo em conta a tabela 11 (capítulo 2), é possível evitar-se cerca de $27,82 \text{ kg CO}_2 \text{ evitado/m}^3$ água processada.

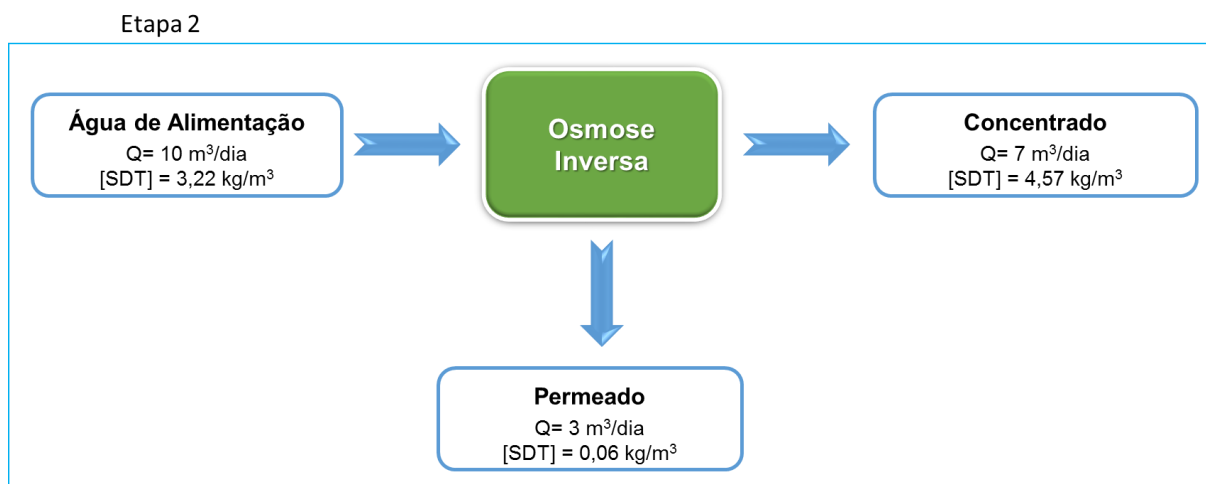


Figura 70 - Balanço de massa para o sistema de Osmose Inversa

Na tabela 20 sistematiza-se a informação relativa aos três cenários possíveis, apresentando-se ainda um outro cenário em que o sistema de HDH funcionaria em 15 ciclos, mas sem ocorrer hibridação com o sistema de OI.

Tabela 20 - Resumo das características dos três cenários possíveis

Cenários	Produção Específica Concentrado ($\text{m}^3\text{concentrado}/\text{m}^3$ água processada)	Produção Específica Destilado ou Permeado ($\text{m}^3\text{destilado ou permeado}/\text{m}^3$ água processada)	[SDT] concentrado (kg/m^3)	[SDT] Destilado ou Permeado (kg/m^3)	Energia (kWh/m^3 água processada)
HDH	0,8	0,2	43,4	1,4	101,5
OI	0,7	0,3	49,7	0,7	4,5
HDH (15 ciclos)	0,053	0,2	99,76	3,22	101,5
Hibridação HDH (15 ciclos) – OI	0,19	0,02	5,96 *	0,06	102,5

* Concentração mista do concentrado do sistema de HDH com o concentrado do sistema de OI

A tabela 20 permite constatar que a hibridação entre os dois sistemas já expostos conduz a uma redução de 76 % na produção específica de concentrado, facto muito relevante já que este constitui um dos principais impactes ambientais da dessalinização. Há que assinalar que a produção específica de água é reduzida em 90 %, no entanto a sua qualidade é mais elevada devido à menor concentração de SDT que nos restantes cenários. Quanto ao consumo energético, não há variação entre as necessidades do sistema HDH simples e com os 15 ciclos, mas há uma redução de cerca de 78 % de energia necessária para processar 1 m³ de água no sistema de OI, visto que a melhoria da qualidade da alimentação (com salinidade consideravelmente inferior à da água do mar) permite operar a baixa pressão.

A figura 71 apresenta o layout da instalação de hibridação do sistema de HDH com reciclagem de concentrado, com o sistema de OI.

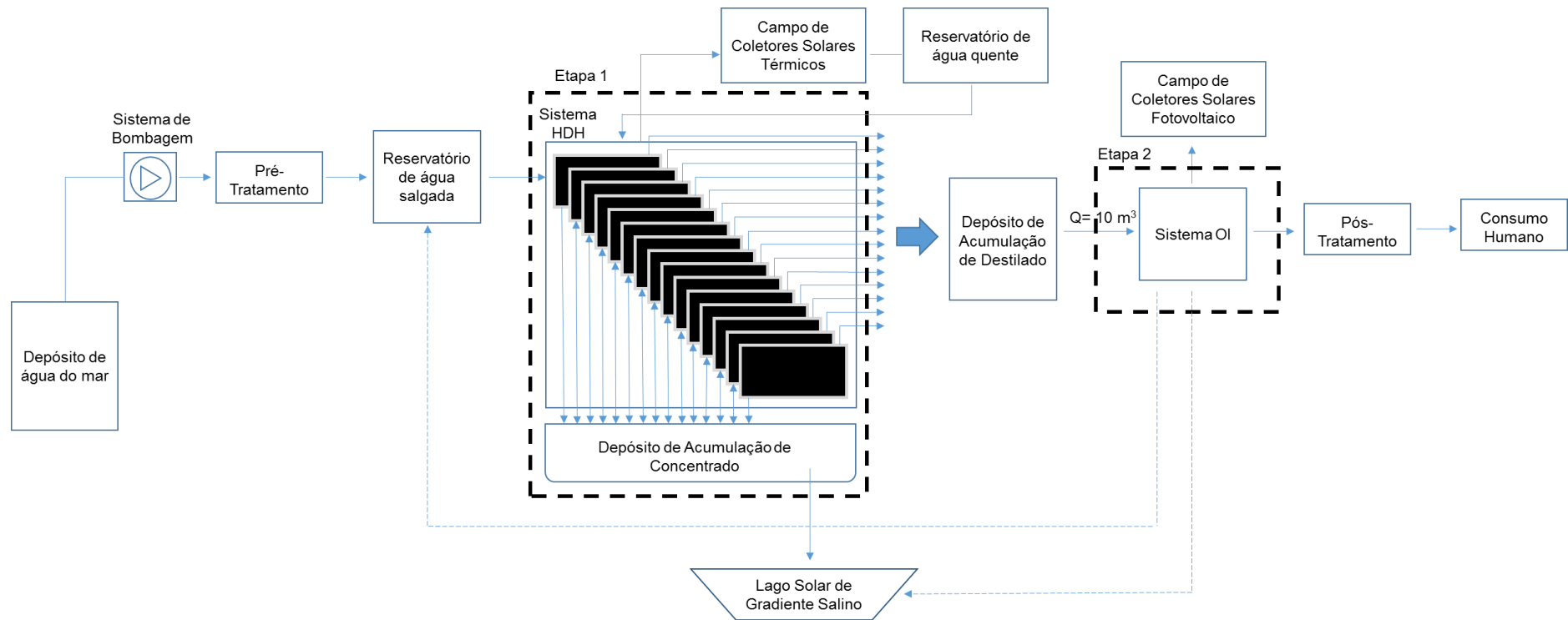


Figura 71 - Layout da instalação de hibridação do sistema de HDH com reciclagem de concentrado, com o sistema de OI

Capítulo 5 - Conclusões e Perspetivas Futuras

O problema da escassez de água é uma questão que tem vindo a afetar de forma global o planeta, existindo a necessidade de se desenvolverem novas formas de abastecimento de água. Assim, a dessalinização deve ser considerada como uma opção viável para dar resposta a este problema, sendo que esta permite o fornecimento de água de forma descentralizada e autónoma.

Os dois processos estudados foram a humidificação-desumidificação e a osmose inversa, sendo que a análise de ambos os processos demonstrou que os efluentes resultantes destas unidades possuem características distintas, o que determina diferenças nos seus potenciais impactes no ambiente.

Para minimizar o impacte ambiental do concentrado a hibridação dos dois sistemas estudados parece ser uma solução possível e inovadora. Esta hibridação permite diminuir os consumos de energia necessária para a ocorrência do processo de dessalinização em 78%, uma vez que a água que alimenta o sistema de OI apresenta uma salinidade reduzida, possibilitando que funcione a baixa pressão. Por outro lado, reduz-se em 76% a produção específica de concentrado e aumenta-se a qualidade de água doce produzida, uma vez que o sistema de OI permite uma afinação à água produzida pelo sistema de HDH.

No que respeita à gestão do concentrado, resultante de uma unidade de dessalinização, do estudo realizado, é possível concluir que a técnica mais utilizada é a descarga à superfície ou submersa. No entanto, considera-se que das várias estratégias existentes, a descarga do concentrado através da técnica do lago solar de gradiente salino é a técnica mais vantajosa em termos ambientais.

Deste modo, foi possível concluir que os impactes da dessalinização, desde que corretamente analisados do ponto de vista ambiental, social e energético podem permitir encontrar uma solução alternativa, por exemplo, relativamente ao elevado consumo de energia pode optar-se por utilizar energias renováveis, evitando-se a emissão de gases de efeito de estufa associados ao uso de combustíveis fósseis.

De modo a complementar a avaliação do potencial do sistema de hibridação alimentado por energia solar aqui descrita, seria fundamental futuramente testar esta abordagem experimentalmente, realizando a hibridação dos sistemas piloto existentes. Por outro lado, dever-se-ia dimensionar os painéis solares necessários para alimentar o sistema e ainda, realizar uma análise económica da viabilidade de aplicação desta solução tecnológica.

Capítulo 6 - Referências Bibliográficas

Agência Portuguesa do Ambiente, I. P. (2012). Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água. Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território.

AKILI D. KHAWAJIA, I. K. M. (2008). Advances in seawater desalination technologies. *Desalination*, **221** pp 47 – 69.

Águas e Resíduos da Madeira, S.A. (2015). Central Dessalinizadora do Porto Santo.

BEBIANNO, M. J. (2007). Introdução às ciências do Mar: Oceanografia Química. Faro.

COOLEY, H., GLEICK, P. H., E WOLFF, G. (2006, June). Desalination, With a Grain of Salt - A California Perspective. Disponível em www.pacinst.org/reports/desalination/desalination_report.pdf.

Decreto-Lei n.º 201/2012 de 27 de agosto. Diário da República, 1.ª série — N.º 165. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.

Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de agosto. Diário da República, 1.ª série — N.º 164. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.

Direção Geral de Energia e Geologia (2014). Energia em Portugal. Ministério da Economia.

Dessalinização na Indústria Hoteleira do Alvor. Disponível em www.goalvor.net/pt/goalvor-news/45-alvor-desalination-going-ahead-in-the-hotel-industry.

EL-DESSOUKY, H.T., E ETTONEY, H.M. (2002). Fundamentals of salt water desalination. 1ª Edição, *Elsevier Science B.V. Holanda*.

EL-GHONEMY, A.M.K. (2012). “Water desalination systems powered by renewable energy sources: Review”. *Renewable and sustainable energy reviews*, **16** pp 1537-1556.

EL-GHONEMY, A. M. (2012). Future Sustainable Water Desalination Technologies for the Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16** (9), pp 6566-6597.

EUROSTAT (2013). Energy Production and Imports. Disponível em http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_production_and_imports/pt.

EUROSTAT (2014). Consumption of Energy. Disponível em http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy.

FAO. Water Scarcity. Disponível em: www.fao.org/nr/water/topics_scarcity.html.

GIESTAS, M., JOYCE, A., LOUREIRO, D., ROSÁRIO, P. (2000) Lagos solares: funcionamento, implementação e manutenção. INETI. Lisboa.

GORIJIAN, S. (2015) Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **48** pp 571–584.

IGA. Caracterização do sistema de dessalinização de Porto Santo. Disponível em: <http://iga.igserv.pt/agua-no-porto-santo.html>.

Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Boletim Climatológico de Portugal Continental, 2015. Disponível em: https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20150903/XdWIDUWlCtqWxmvYtPNp/cli_20150801_20150831_pcl_mm_co_pt.pdf.

JORGE, C., ABDELKARIM, M., CASIMIRO, S. (2014) Instalação de Dessalinização por Osmose Inversa no Alvor. LNEG, Lisboa

KALOGIROU, S. A., (2009). Solar Energy engineering: processes and systems. USA: Academic Press.

KENNISH, M.J. (2001). Practical handbook of marine science. 3ª Edição, CRC Press LLC. Florida.

LATTEMANN, S., KENNEDY, M. D., SCHIPPERS, J. C., & AMY, G. (2010). Global Desalination Situation. In I. C. Escobar, & A. I. Schafer (Eds.), Sustainable Water for the Future: Water Recycling Versus Desalination (Vol. 2, pp 7-38). Oxford, U.K.: Elsevier B.V.

LEUSBROCK, I. (2011). Removal of Inorganic Compounds Via Supercritical Water: Fundamentals and Applications. Dissertation, University of Groningen, Netherlands.

LEVY, J. Q. (2008). Novas Fontes de Abastecimento - Reutilização e Dessalinização (1ª ed.) Ecoserviços.

LU, H., WALTON, J. C., SWIFT, A. (2001). Desalination coupled with salinity: Gradient Solar Pounds. *Desalination*, **136** pp 13-23. The University of Texas. El Paso.

MENDES, J.F. (2010). Apresentação de slides de Energia Solar Térmica - Ponto da situação e caminhos para 2020.

MEZHER, T., FATH, H., ABBAS, Z., E KHALED, A. (2011 - 31 janeiro). Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies. *Desalination*, **266** (1-3), pp 263-273.

MICKLEY, M. HAMILTON C., GALLEGOS R., L., & TRUESDALL J. (1993). Membrane Concentrate Disposal. Mickley and Associates, Boulder, CO, AWWARF, and AWWA.

MICKLEY, M. (2001). Membrane Concentrate Disposal: Practices and Regulation. U.S. Department of the Interior, Bureau of reclamation, Technical Service Center, Water Treatment Engineering and Research Group, Denver.

MOREIRA, M., JOYCE, A., & PINA, H. (1994). Seminário de Manutenção. O problema da escassez de água potável e a questão da dessalinização. Faro.

National Research Council (2008). Desalination: A National Perspective. Comitee on Advancing desalination. Washington, D.C.

NARAYAN, G. P., SHARQAWY, M. H., SUMMERS E. K., LIENHARD, J. H., ZUBAIR, S. M., E ANTAR, M. A. (2010). "The potential of solar-driven humidification–dehumidification desalination for small-scale decentralized water production". *Renewable and sustainable energy reviews*, **14** pp 1187–1201.

NAWAYSEH, N., FARID, M., OMAR, A., SABIRIN, A. (1999). Solar desalination based on humidification process – II. Computer simulation. *Energy Conversion & Management*, **40** pp 1441 - 1461.

PATRÍCIO, O. (2014). Energia solar. Universidade de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa.

PIRES, V., SILVA, A., E MENDES, L. (2010). "Riscos de secas em Portugal Continental". *Territorium*, **17** pp 27-34.

REN 21 (2015). Renewables: Global Status Report. Paris, France, pp 31.

SANTOS, C., BARREIROS, A., PESTANA, P., CARDOSO, A., FREIRE, A. (2011). Environmental status of water and desalination around submarine outfalls – west coast of Portugal. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, **11** pp 207 -217.

SEMIAT, R. (2000). Desalination: Present and Future. *Water International*, vol. 25, Nº1.

Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. (2015). Situação das bacias hidrográficas em 2015. Disponível em http://snirh.pt/index.php?idMain=1&idItem=1.3&sbaciaid=&szonas=&salbueirasimbolo=&n_mesBOLETIM=04&n_anoH=2011.

SHATAT, M., WORALL M., RIFFAT, S. (2013). Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. *Sustainable cities and society*, **9** pp 67-80.

SHIKLOMANOV, I. A., RODDA, J. C. (2003). World water resources at the beginning of the twenty-first century, Cambridge University Press.

TSIOURTIS, N. X. (2001). Desalination and the environment. *Desalination*, **141** pp 223 – 236.

UNDESA. (2014). International Decade for Action “Water for life” 2005-2015. Disponível em: http://www.un.org/waterforlifedecade/water_and_sustainable_development.shtml

UNEP. (2008). Vital Water Graphics- An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters. Disponível em: www.unep.org/dewa/vitalwater/rubrique42.html.

United Nations Development Programme. (2006) Relatório do desenvolvimento humano 2006, Capítulo 4. Disponível em: http://hdr.undp.org/en/media/05Chapter4_PT.pdf.

VEDACHALAM, S., RIHA, S. (2012). Desalination in northeastern U.S.: Lessons from four case studies. *Desalination*, **297**, pp 104 -110.

VOUTCHKOV, N. (2015). State-of-the-art of Concentrate Management for Desalination Plants. Techno Focus. Asian Water, pp 17-22

Wangnick/GWI. (2005) Worldwide Desalting Plants Inventory. Oxford, England: Global Water Intelligence, 2005.

World Health, O. (2007). Desalination for Safe Water Supply, Guidance for the Health and Environmental Aspects Applicable to Desalination. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

XU, P., TZAHI, Y., ROBERTSON, A., REINHARD, M., LECKIE, J., DREWES, J. (2013) Critical Review of Desalination Concentrate Management, Treatment and Beneficial Use. *Environmental Engineering Science*, **30** (8), pp 502-514

YOUNOS, T. (2005). Environmental Issues of Desalination. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, **132** pp 11-18.

ANEXOS

Anexo I

Parâmetros de desempenho da Osmose Inversa

O processo de osmose inversa é definido pelos seguintes parâmetros, que avaliam a tanto a produção como a qualidade da água.

- ✓ Pressão osmótica – pressão necessária para que o potencial químico da água, na solução de alimentação, seja elevado ao valor do da água pura à pressão atmosférica (Pinho, 2002).

$$\pi = R T \sum X_i$$

Onde:

π – Pressão osmótica = (kPa)

R - Constante dos gases = 8,314 (kPa m³ / kmol K)

T - Temperatura (K)

$\sum X_i$ – Concentração de todos os constituintes na solução (kmol)

- ✓ Taxa de rejeição – exprime a eficiência da membrana ao remover os sais da água. Obtém-se através do quociente da diferença entre a concentração de sais da água de alimentação e a concentração do destilado, e a concentração de sais na água de alimentação (El-Dessouky et. al, 2002).

$$SR = 100 \times \left[1 - \frac{(X_p)}{X_f} \right]$$

Onde:

X_p – Concentração do permeado

X_f – Concentração da água de alimentação

- ✓ Taxa de recuperação do destilado - indica a proporção de água de alimentação que é convertida em água doce (destilado). Obtém-se através do quociente entre a diferença da taxa de fluxo da água de alimentação e a taxa de fluxo do destilado, e taxa de fluxos na água de alimentação (El-Dessouky et. al, 2002).

$$R = 100 \times \left[1 - \frac{(M_p)}{M_f} \right]$$

Onde:

M_p – Taxa de fluxo do destilado

M_f – Taxa de fluxo da água de alimentação

Anexo II

Tipos de Humidificação-Desumidificação

Como foi referido, existem vários tipos de humidificação-desumidificação como:

Humidificação-Desumidificação de ar aberto, água fechada de água aquecida

Neste sistema, o ar é aquecido e humidificado no evaporador, usando água quente proveniente do coletor solar, posteriormente, este é desumidificado usando a água de saída do evaporador.

Antes da água ser pré-aquecida no condensador, entra no coletor solar, funcionando num ciclo fechado. O ar desumidificado é lançado para a atmosfera (figura 1).

Como o processo de humidificação não arrefece o suficiente a água, a temperatura da água no evaporador aumenta, limitando a desumidificação do ar húmido, resultando numa produção reduzida de água, em comparação com o ciclo de água aberta.

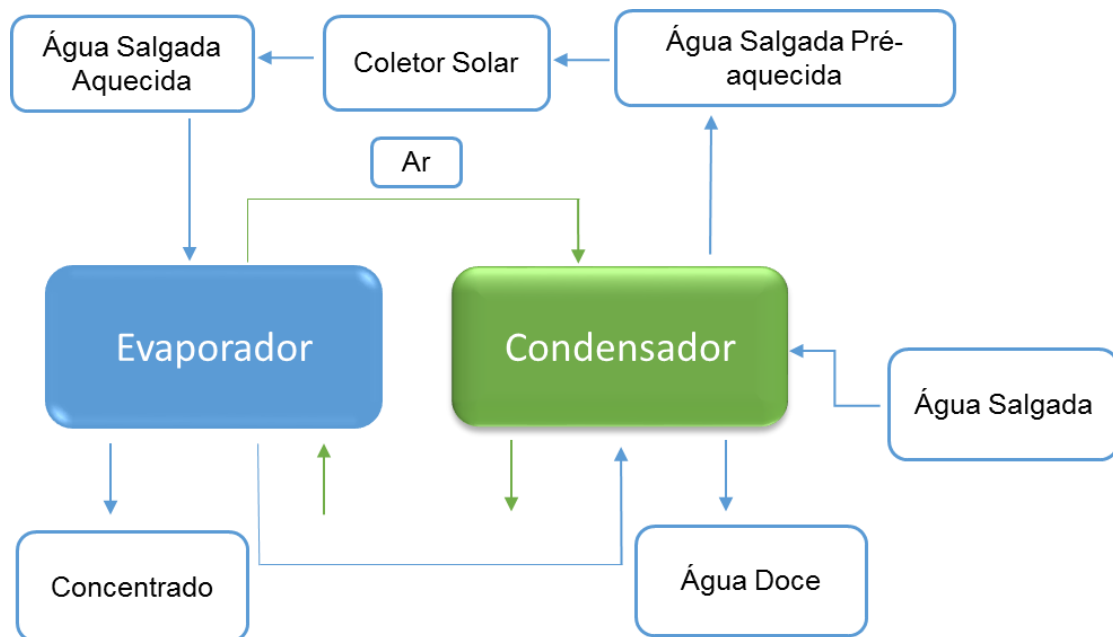


Figura 1 - Processo de funcionamento da tecnologia Humidificação-Desumidificação de ar aberto, água fechada (Narayan et. al, 2010)

Humidificação-Desumidificação de ar fechado, água aberta de ar aquecido

Estes sistemas podem ser de dois tipos, simples ou multi-efeito, onde o ar é aquecido no coletor solar até 80-90 °C e é enviado para o humidificador, onde é arrefecido e saturado (figura 2). Este sistema tem o inconveniente da humidade absoluta do ar ser muito baixa, para estas temperaturas, impedindo a produtividade do ciclo.

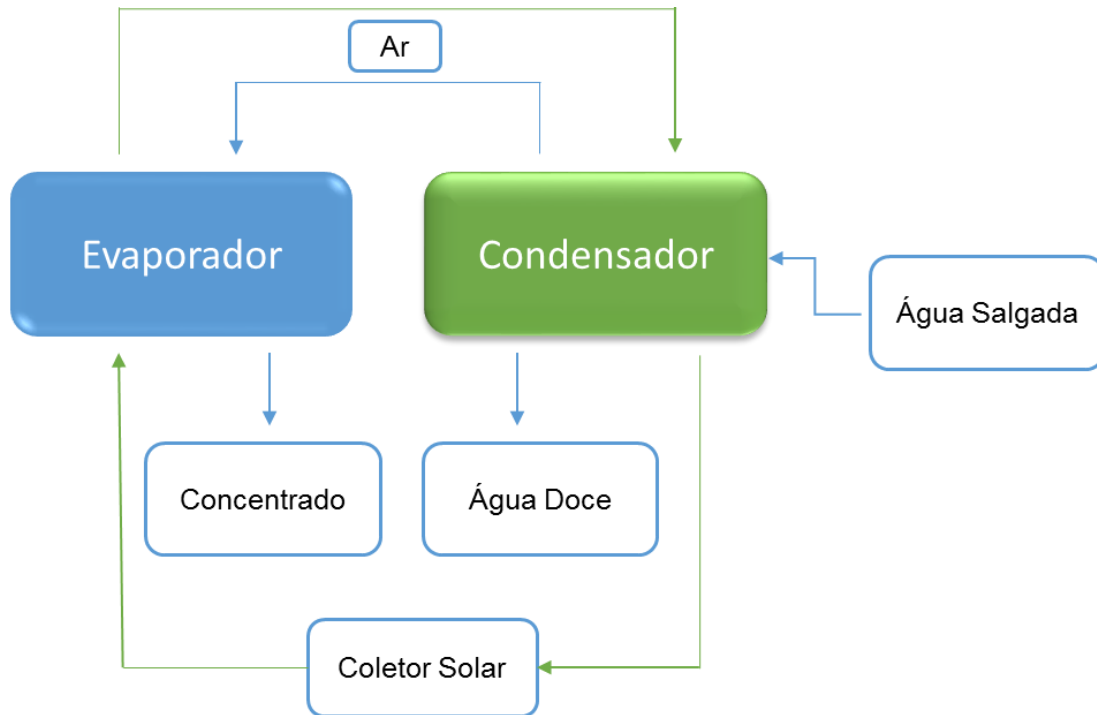


Figura 2 - Processo de funcionamento da tecnologia Humidificação-Desumidificação de ar fechado, água aberta de ar aquecido (Narayan et. al, 2010)

Anexo III

Trabalhos preparatórios do trabalho experimental do protótipo HDH

Os trabalhos preparatórios necessários para a realização do trabalho experimental envolveram a instrumentação de sensores termopares do tipo T, do condutivímetro digital, e do sistema de aquisição de dados.

Os termopares do tipo T são dispositivos constituídos por dois metais distintos (cobre e níquel) unidos nas extremidades formando um circuito fechado. Estes sensores são utilizados para efetuar a medição da temperatura da água em alguns pontos do protótipo HDH.

O seu funcionamento baseia-se no efeito de *Seebeck*, isto é, é produzida uma diferença de potencial entre duas junções de condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando elas estão a diferentes temperaturas, permitindo determinar a temperatura do processo. Os termopares permitem medir a temperatura em meios onde existe mistura ar/água, operam numa gama de temperaturas entre -180 °C e 370 °C e ainda, possuem uma margem de erro típica de 0,5 °C.

O condutivímetro digital utilizado é da marca WTW – LF 597-S e serve para medir a condutividade da água. A medição da condutividade consiste na utilização de dois elétrodos que, ao se aplicar uma tensão alternada num deles, causa a migração dos iões entre elétrodos. Assim sendo, quanto maior a condutividade maior será a concentração de sais da solução. A condutividade típica da água para consumo é de 100 – 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e da água do mar é tipicamente 40 000 – 50 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

O *Agilent 34970 A* é o sistema de aquisição de dados utilizado que permite monitorizar parâmetros como a temperatura, a tensão e a frequência durante um determinado tempo. Este equipamento possui uma margem de erro de 0,8 °C quando efetua medições em sensores termopares do tipo T. O *Benchlink Data Logger 3* é o software de interface da *Agilent* que permite visualizar e analisar os parâmetros em tempo real, como também elaborar gráficos ou exportar dados para o Excel.

Antes de se iniciarem os ensaios foi efetuado um teste em banho de gelo aos sensores. A realização deste teste tem como objetivo avaliar a necessidade de calibração dos sensores termopares do tipo T presentes no protótipo HDH, através de um teste em banho de gelo.

Para a realização do teste utilizou-se um termómetro digital como referência para o gelo, gelo fundente, sensores de temperatura (termopares tipo T), esferovite, sistema de aquisição de dados *Agilent 34970 A* e uma caixa isoladora.

Iniciou-se a atividade experimental colocando o recipiente com o gelo fundente dentro da caixa isoladora e isolou-se o topo com esferovite, de modo a evitar que o ar ambiente derreta o gelo (figura 1).

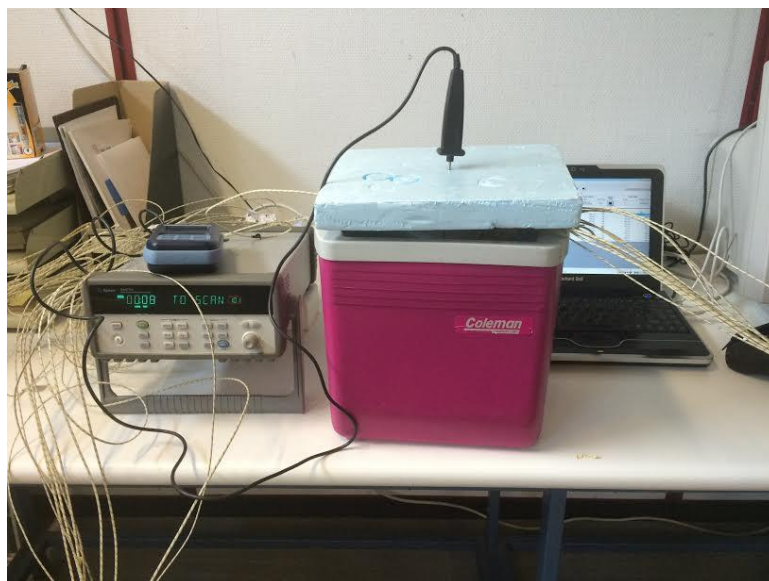


Figura 1 - Teste do gelo fundente

Seguidamente colocaram-se os sensores dentro do gelo, à mesma profundidade e mediu-se a temperatura do gelo com um termómetro digital ($\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), como representado na figura anterior. Os valores da temperatura para cada sensor foram registados no sistema *Agilent 34970 A* de 10 em 10 segundos, durante uma hora (figura 2).

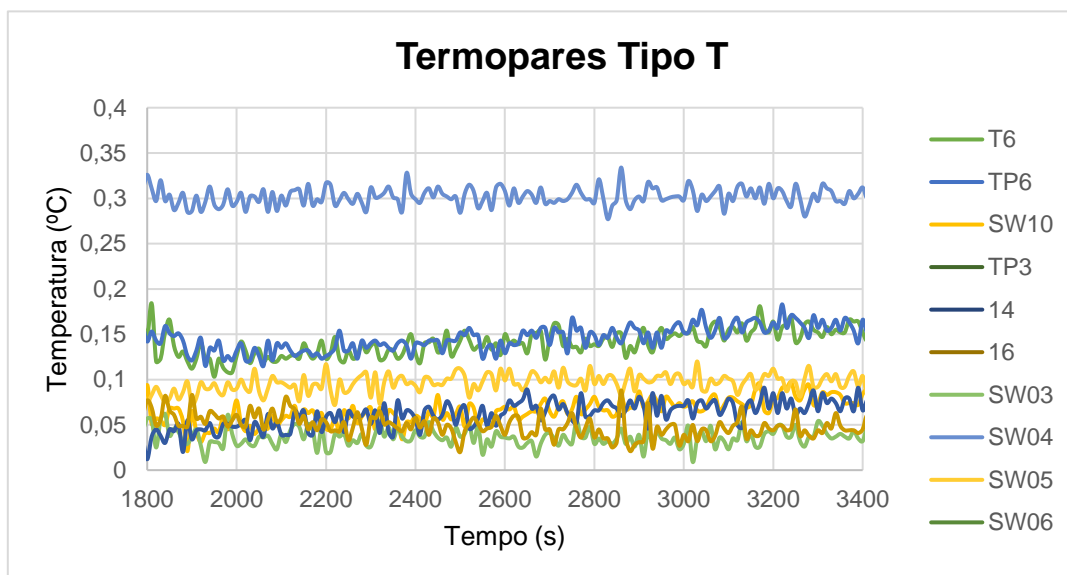


Figura 2 – Evolução da temperatura dos sensores de temperatura

Por fim, analisou-se a média e o desvio padrão de cada sonda, como representado na tabela 1.

Tabela 1 - Média e desvio padrão de cada sensor de temperatura

Sensor	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
T6	0,15	0,02
TP6	0,15	0,01
TP2	0,07	0,01
TP3	0,79	0,15
14	0,04	0,01
16	0,30	0,02
SW03	0,09	0,01
SW04	0,06	0,02
SW05	0,05	0,01
SW06	0,12	0,02
SW07	0,23	0,03
SW08	0,14	0,03

Após a análise e interpretação dos dados obtidos, conclui-se que os sensores termopares estão dentro da margem de erro estipulada para este tipo de sensores ($\pm 0,5$ °C), assim sendo, a sua calibração não foi necessária. O termopar TP3 foi excluído pois a sua média é superior à margem de erro estipulada.

Anexo IV

Equações utilizadas na obtenção de resultados para o protótipo HDH

As equações utilizadas para se obter se o balanço de energia e de massa para o protótipo HDH são:

Balanço de Energia

$$\dot{m}_w C_{pw} T_3 - \dot{m}_{rejeitado} C_{pw} T_{rejeitado} = \dot{m}_w C_{pw} (T_2 - T_1) + \dot{m}_{destilado} C_{pw} T_{destilado} \quad (1)$$

$$\dot{m}_w C_{pw} (T_2 - T_1) = \dot{m}_a C_{pa} (T_4 - T_5) - \dot{m}_{destilado} C_{pw} T_{destilado} \quad (2)$$

$$\dot{m}_a C_{pa} (T_4 - T_5) = \dot{m}_w C_{pw} T_3 - \dot{m}_{rejeitado} C_{pw} T_{rejeitado} \quad (3)$$

$$\dot{E}_i = \dot{m}_w C_{pw} (T_3 - T_2) \quad (4)$$

Balanço de Massa

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{destilado} + \dot{m}_{rejeitado} \quad (5)$$

Anexo V

Modelo físico-matemático - *Simulink*

A simulação dos dados provenientes do protótipo humidificação-desumidificação é feita a partir da ferramenta *Simulink*.

Esta ferramenta consiste num modelo físico-matemático que é composto por equações que descrevem os balanços energéticos e mássicos relativos às câmaras interior e exterior (evaporador e condensador) de um dessalinizador, assim como as equações de permuta entre eles. É complementado com as equações do módulo de aquecimento e com as equações do fluxo de massa de ar.

A figura apresentada abaixo ilustra um corte transversal do dessalinizador exibindo ambas as câmaras.

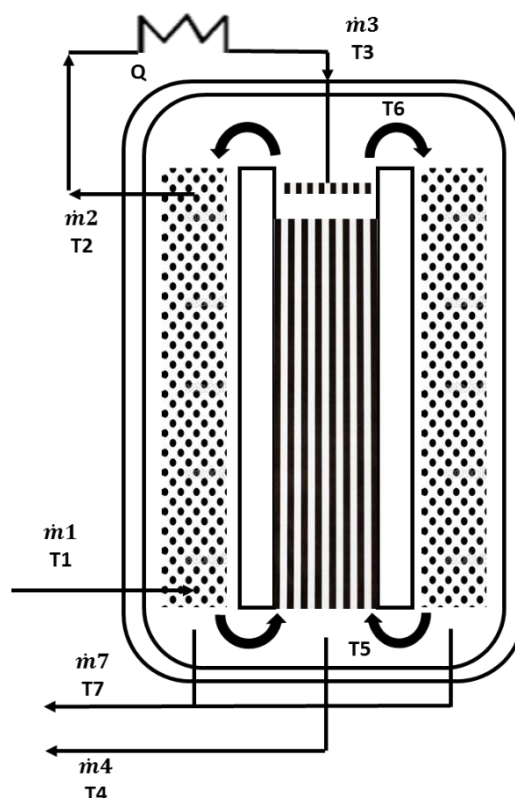


Figura 1 - Esquema de funcionamento do protótipo HDH

A função da câmara exterior consiste em receber a água à temperatura T_1 dentro do tubo, a qual será aquecida até a temperatura T_2 . Este pré-aquecimento é feito por condução através das paredes do tubo.

Após o pré-aquecimento, a água entrará no módulo de aquecimento, exterior ao dessalinizador onde levará um input energético que a fará subir para uma temperatura T_3 (bastante superior a T_2).

O módulo de aquecimento poderá recorrer a diferentes *set ups* de aquecimento com diferentes fontes energéticas, consoantes as necessidades do protótipo.

A função da câmara interior consiste em receber a água aquecida a uma temperatura **T3**, proveniente do módulo de aquecimento. Após a evaporação, origina-se o ar seco, **T5**, o ar saturado, **T6** e o rejeitado, **T4**. É essencial que a temperatura do rejeitado seja relativamente baixa para que os impactes da sua descarga no meio aquático sejam minimizados.

O ar saturado é consequência da ação do evaporador dentro da câmara interior, enquanto que o ar seco provém da permuta que ocorre na câmara exterior. Tanto o ar seco, como o ar saturado, atravessam ambas as câmaras por ação.

Este modelo físico-matemático possui uma nomenclatura própria, dividida em parâmetros físicos e geométricos que são apresentados abaixo (tabela 1 e 2).

Tabela 1 - Parâmetros físicos do modelo do dessalinizador

Parâmetros	Descrição
C_p [J/ kg K]	Calor específico da água
g [m/s ²]	Aceleração da gravidade
h [J/kg]	Entalpia do ar
\dot{m}_i [kg/ s]	Caudal mássico de água à Temperatura i
\dot{m}_a [kg/ s]	Caudal mássico de ar
K [kg/m ² s]	Coef. de transf. de massa no humidificador
Q [W]	Potência de Aquecimento
T [°C]	Temperatura
h_o [W/m ² K]	Coef. de transf. de convecção para fora do tubo
h_i [W/m ² K]	Coef. de transf. de convecção para dentro do tubo
U_{cond} [W/m ² K]	Coef. global transf. de calor do condensador (condução e convecção)
U_{loss} [W/m ² K]	Coef. global transf. calor de perdas (condução e convecção)
W_i [kg /(kg de ar seco)]	Humidade correspondente à temp. i
v [m/s]	Velocidade do Ar
ρ [kg /m ³]	Massa volúmica da água
μ [kg /m s]	Viscosidade dinâmica

Parâmetros	Descrição
$\nu \text{ [m}^2/\text{s]}$	Viscosidade cinemática
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds

Tabela 2 - Parâmetros geométricos do modelo do dessalinizador

Parâmetros	Descrição
$a \text{ [m}^2\text{]}$	Área do Evaporador
$A_i \text{ [m}^2\text{]}$	Área superior interior do condensador
$A_o \text{ [m}^2\text{]}$	Área superior exterior do condensador
$r_o \text{ [m]}$	Raio externo do tubo
$r_i \text{ [m]}$	Raio interno do tubo
$r_{iud} \text{ [m]}$	Raio interior da unidade de dessalinização
$r_{oud} \text{ [m]}$	Raio exterior da unidade de dessalinização
$h_{evap} \text{ [m]}$	Altura da câmara de evaporação
$evap_V \text{ [m}^3\text{]}$	Volume do enchimento
$evap_A \text{ [m}^2\text{]}$	Área do pacote de enchimento
$d_i \text{ [m]}$	Diâmetro interno do tubo
$L \text{ [m]}$	Altura da zona de enchimento
$L_{tubo} \text{ [m]}$	Comprimento do tubo
$V \text{ [m}^3\text{]}$	Volume do evaporador
$L_c \text{ [m]}$	Diâmetro do evaporador
$L_{cc} \text{ [m]}$	Comprimento entre centro do evaporador e parede

Para cada temperatura referida na tabela 1, a entalpia (h) e humidade específica (w) são dadas pelas seguintes equações:

a) Entalpia

$$h = (0.00585T^3 - 0.497T^2 + 19.87T - 207.61) * 4,180 \text{ [kJ/kg]} \quad (1)$$

Exceto para h_3 e h_4 entalpias do ar as quais vêm dadas por:

$$h_3 = Cp \times T_3$$

$$h_4 = Cp \times T_4$$

b) Humidade específica

$$W = (2.19 \times 10^{-6}T^3 - 1.85 \times 10^{-4}T^2 + 7.06 \times 10^{-3}T - 0.077) \text{ [kg/dry kg]} \quad (2)$$

As equações descritivas dos balanços que ocorrem na unidade de dessalinização são:

a) Balanço Energético

$$\dot{m}_a(h_6 - h_5) = \dot{m}_1 C_p(T_2 - T_1) / \text{condensador} \quad (3)$$

$$\dot{m}_a(h_6 - h_5) = \dot{m}_1 C_p(T_3 - T_4) / \text{evaporador} \quad (4)$$

b) Balanço Mássico

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_a(W_6 - W_5) / \text{condensador} \quad (5)$$

$$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = \dot{m}_a(W_3 - W_4) / \text{evaporador} \quad (6)$$

c) Permutador Evaporador/Condensador

$$\dot{m}_a(h_6 - h_5) = kaV \left[\frac{(h_3 - h_6) - (h_4 - h_5)}{\ln \frac{(h_3 - h_6)}{(h_4 - h_5)}} \right] \quad (7)$$

$$\dot{m}_1 C_p(T_2 - T_1) = U_{cond} A_{cond} \left[\frac{(T_6 - T_2) - (T_5 - T_1)}{\ln \frac{(T_6 - T_2)}{(T_5 - T_1)}} \right] \quad (8)$$

d) Módulo de Aquecimento

$$Q = \dot{m}_1 C_p(T_3 - T_2) \quad (9)$$

e) Fluxo de ar

$$\rho g(T_6 - T_5) \beta L - 0.5 \xi \rho v^2 = 0 \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1}{\frac{(T_6 + T_5)}{2} + 275} \quad (11)$$

$$\dot{m}_a = \rho A v \quad (12)$$

f) Destilado

$$\dot{m}_2 - \dot{m}_4 = \dot{m}_7 \quad (13)$$

g) U_{cond}

$$U_{\text{cond}} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_0/r_i)}{2\pi KL} + \frac{A_i}{A_0} \times \frac{1}{h_0}} \quad (14)$$

Onde:

$$h_i = \frac{Nu \, Kag}{2r_i}$$

$$h_0 \cong \frac{Gra \times Kag. \, ext}{r_0}$$

$$Gra = \frac{g \beta \Delta T l^3}{v^2}$$

$$Nu = 0.023 \, Re^{0.8} \, Pr^{0.4}$$

$$Re = \frac{\rho \, v_{ag} \, d_i}{\mu}$$

$$v_{ag} = \frac{\dot{m}_1 d_i}{i \, \rho \, A_i} \quad (15) \quad i, \text{ n}^\circ \text{ de entradas}$$

Tabela 3 - Valores utilizados no modelo geral

Parâmetros	Valores
h_i	124,9
h_o	0,04
K_{ag}	0,63
L_{tubo}	300
L	0,712
r_o	0,0085
r_i	0,0075
$K_{ag,Int}$	0,63
$K_{ag,Ext}$	0,03
K	0,036
ρ_{agua}	998
ρ_{ar}	1,014
μ	$6,82 \times 10^{-3}$
Pr	0,708
U_{cond}	5,15
A_{cond}	15,8
v_{ag}	0,086

As variáveis de entrada do sistema são \dot{m}_1 , T_1 e Q e o valor das outras temperaturas e massas resultam da resolução do sistema considerado fechado.

Verifica-se que os valores destas variáveis têm que pertencer a determinados intervalos, caso contrário obtêm-se impossibilidades numéricas. Estas advêm da proximidade entre entalpias (h) ou humidades específicas (W) nos logaritmos nas Eq. (7) e (8).

Do ponto de vista termodinâmico as variáveis que mais condicionam o sistema são o fluxo de ar, \dot{m}_a e o caudal de água à temperatura 1, \dot{m}_1 .

Intervalos observados para as variáveis de entrada:

a) Temperatura

$$T_1 \in [12\text{ °C}; 40\text{ °C}]$$

b) Fluxo de Ar

Observe-se que para a obtenção de m_a , o número de iterações é importante:

Para 6itt $\dot{m}_a = 0,018\text{ kg/s}$

40itt $\dot{m}_a = 0,0072\text{ kg/s}$

$$\dot{m}_1 \in [0,0088; 0,0125] = [31,68\text{ kg/k}; 45,0\text{ kg/h}] \quad \text{água}$$

Sendo a massa de ar típica para este intervalo,

$$\dot{m}_a \in [0,013; 0,02911] = [46,8\text{ kg/h}; 104,8\text{ kg/h}] \quad \text{ar}$$

Nesta fase o modelo funciona para intervalos muito restritos, onde os parâmetros de entrada devem ser aferidos com os dados experimentais do protótipo, sendo estes inexistentes.

Tem-se assim que, dentro das condicionantes geométricas impostas o modelo fechado funciona para os intervalos apontados:

$$T_1 \in [12\text{ °C}; 40\text{ °C}]$$

$$\dot{m}_a \in [0,013; 0,02911] = [46,8\text{ kg/h}; 104,8\text{ kg/h}] \quad \text{ar}$$

$$\dot{m}_1 \in [0,0088; 0,0125] = [31,68\text{ kg/h}; 45,0\text{ kg/h}] \quad \text{água}$$

A figura 2 apresenta o diagrama geral do modelo *Simulink*.

